

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：水工構造物チーム
（水工研究グループ）

研究担当者：佐々木隆（上席）、金銅将史、
佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹

【要旨】

供用開始後長期間経過したダムが増加する中であって、ダム本体における各種劣化・損傷事象の実態やその長期的な進行メカニズムに関する知見は十分でない。しかし、ダムを長期にわたり安全に供用していくためには、将来的な劣化・損傷の進行や、それがダムの安全性に与える影響度合いを考慮した合理的な維持管理が求められる。また、ダムの合理的な維持管理のためには、経験豊富な技術者の減少も踏まえつつ、長期供用に伴い挙動の安定化したダムにおける合理的な安全管理のための各種計測のあり方を検証するための考え方を明確化していくことも重要な課題である。本研究は、このような課題の解決するため、長期供用に伴うダム本体の劣化・損傷機構やそれを踏まえたダムの安全性への影響度の定量的な評価方法、また挙動が安定したダムでの計測を継続すべき基本計測項目・箇所等の考え方を明らかにすることを目的とし、コンクリートダム本体を主な検討対象として実施するものである。

平成 24 年度は以下の検討を行った。

- ① ダム本体等の劣化・損傷事象に関する過年度の調査・分析結果を踏まえ、長期供用に伴い想定すべき劣化・損傷機構についてその類型を整理した。
- ② ダム本体の劣化・損傷が堤体の安全性に及ぼす影響度を定量的に評価するため、ダム堤体の健全度診断手法の 1 つとして、常時微動計測の適用性（劣化・損傷による影響の検出可能性）に関して、貯水位や温度の変化による影響、堤体の補強対策による影響について検討した。また、①で抽出した劣化・損傷の類型のうち、ダム堤体の安全性に影響が大きいと考えられる水平打継面の劣化・損傷を例とし、大規模地震時に想定される損傷の進行がダム堤体の安全性に及ぼす影響について検討を行った。
- ③ 過年度に整理した「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方（案）」について、実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、適用性の検証を行った。

キーワード：ダム、劣化・損傷、健全度診断、常時微動、安全管理

1. はじめに

わが国では、1900 年以降、おおよそ 2500 基のダムが建設された。高度経済成長期の 1960～1970 年代に建設のピークを迎えたダムが供用開始後数十年を経過するなど、供用後長期間が経過するダムの数が急増しつつある。このような中、構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術を確立し、各種劣化・損傷が現状・将来的に構造安定性に与える影響度の定量的な評価を行い、適切な段階で、適切な補修を実施することで、安全性の確保を前提としたライフサイクルコストの削減を達成できる合理的な維持管理が必要となってきた。また、ダム事業減少によりダムの設計・施工・構造に係る豊富な知識・経験を有する技術職員が減少し、技術的知識を必ずしも十分に有していない職員がダムの安全管理を行う場合も

想定し、ダムの状態変化に応じた適切な維持管理を実現するため、長期供用ダムにおける安全管理のための計測の考え方を明確化することが求められている。

本研究は以上の課題解決に寄与することを目的とし、以下に示す 3 つの達成目標を掲げ研究を実施する。

① 各種劣化・損傷機構の類型化の提案

国内外のダムの劣化・損傷事象の報告例等を調査・分析し、ダムの安全性に影響を及ぼす事象を抽出した上でその発生機構について類型化する。

② ダムの安全性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷評価方法の提案

ダム本体の劣化・損傷機構による安全性への影響をダムの実測挙動解析や数値解析による分析により定量的に評価する方法を、定期点検や地震後臨時点検等での点検

箇所や補修など対策箇所の優先度を検討する際の考え方として示す。

③ ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定方法の提案

挙動の安定した長期供用ダムにおける合理的な安全管理のための基本計測項目・箇所の考え方を明確化する。

なお、ダムはその堤体材料によりコンクリートダムとフィルダムに大別されるが、人工材料であるコンクリートはその長期的な劣化の進行や構造体としてのダムの安全性への影響において未解明の部分が多い。このため、本研究での各種調査・分析はコンクリートダムの堤体を主な対象とする。ただし、必要に応じてフィルダムの洪水吐きなどその他のコンクリート構造部分も対象に加える。

平成24年度においては、以下の検討を行った。

上記①に関して、コンクリートダム本体等の劣化・損傷事象に関する過年度の調査・分析結果を踏まえ、長期供用に伴い想定すべき劣化・損傷機構についてその類型を整理した。

②に関しては、ダム堤体の健全性診断手法の1つとして、常時微動計測の適用性（劣化・損傷による影響の検出可能性）を明らかにするため、貯水位や温度の変化による影響、堤体の補修による影響について検討した。また、①に関する検討で抽出した劣化・損傷の類型を踏まえ、ダム堤体の安全性に影響が大きいと考えられる水平打継面の劣化・損傷が大規模地震時に想定される損傷がダム堤体の安全性に及ぼす影響を数値解析的に検討した。

③に関しては、過年度に整理した「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方（案）」について、実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、その適用性の検証を行った。

2. 各種劣化・損傷機構の類型化

2.1 劣化・損傷事象の調査・分析

本研究では、ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理手法の確立に向け、種々の劣化・損傷がダムの安全性にどのような影響を及ぼすかを評価する上で、劣化・損傷の発生・進展の機構を明らかにするため、まず供用後長期間経過した全国のダムにおいて実施された既往の総合点検結果のうち、コンクリートダム堤体等（コンクリートダムの本体と洪水吐き部及びフィルダムの洪水吐き部）に関する点検結果報告に記載のある劣化・損傷事象について調査・分析した（図- 2.1）^{1) 2)}。

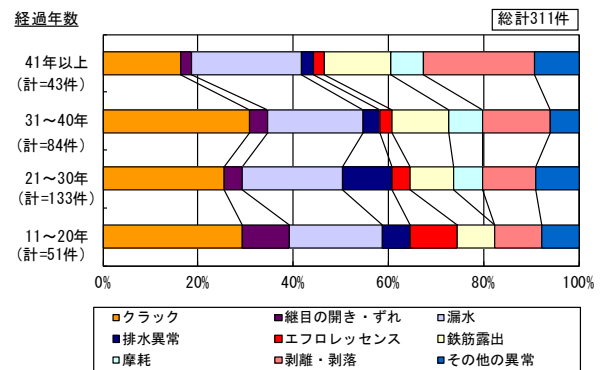


図- 2.1 供用年数ごとの劣化・損傷事象の報告件数の比率

図- 2.1 に示すとおり、点検等で報告される劣化・損傷事象は様々である。また、個々の事象は、例えば、温度変化による堤体表面のクラックから浸入した水分が凍結融解作用によりクラックを進行させ、さらには漏水を生じたり、越流部の摩耗が進行して表面コンクリートの剥離や鉄筋露出が生じたりといったように、互いに独立した発生原因を持つものでなく、何らかの（時には複数の）原因により初生的に生じたものが他の要因により助長・拡大されるケースも多いと考えられる。図- 2.1 に挙げた個々の事象のいくつかは、これらの一連の劣化・損傷の進行過程の中で異なる進行段階を見ているに過ぎないと考えられる。

2.2 劣化・損傷機構とその類型

本研究では、長期的な劣化・損傷の進行がダムの安全性に及ぼす影響を定量的に評価する方法を明らかにすることを1つの目標にしている。このような評価は、点検等で観察される劣化・損傷を単にその形態、状態、発生場所（部位）別で分類・定義される「事象」として捉えるだけでは困難である。それぞれの事象を生じさせることになった原因や時間的経過に伴う進行がどのような「機構」（メカニズム）によるものかを理解することが必要である。現状で観察される状態が劣化・損傷事象の発生・進展機構のどの段階にあるのかを診断によって明らかにすることにより、はじめて将来的にどのような状態変化が想定されるか及びそれによってダムの安全性にどの程度の影響を及ぼすかを定量的に評価することが可能になると考えられる。

そこで、図- 2.1 に示した各種劣化・損傷事象と、コンクリートダムにおいて想定すべき主要な劣化・損傷の

発生・進展機構（各事象が生じる物理的・化学的な原理・現象及びそれらの発生原因または進行要因の代表的な例）との関係について考えられるものを整理すると表-

2.1 のようになる。

表- 2.1 コンクリートダム堤体等において報告される各種劣化・損傷事象とその発生・進展機構

劣化・損傷事象	各事象の発生・進展機構		
	原理・現象		発生原因・進行要因の例
クラック	温度応力	マスコンクリート内の熱膨張と表面温度低下による温度不均一による変形拘束（内部拘束）	温度変化（コンクリート内部と表面の温度降下の違い）
		基礎岩盤や既打設コンクリート等による変形拘束（外部拘束）	温度変化（新たに打設したコンクリート部の温度降下）
	乾燥収縮	コンクリート内の水分蒸発に伴う体積減少	コンクリート表面の養生不足
	堤体材料（骨材）	骨材の体積膨張・収縮	物理的に安定でない鉱物等を多く含む骨材の使用
		アルカリ骨材反応	化学的に安定しない反応性骨材の使用
	凍結融解作用	コンクリート中の水分の凍結融解繰り返しによる体積変化	継目や他原因のクラックからの水の浸入、吸水性の高い骨材の使用
	鋼材腐食	R/C構造部における水分浸入による鋼材表面の不動態被膜の破壊	先行クラック、剥離、中性化等によるかぶりコンクリートの劣化
継目の開き・ずれ	外力作用	コンクリート強度を上回る応力	大規模地震等の外力
	相対変位の蓄積	堤体ブロックの相対変位	地形・基礎岩盤剛性急変部
	外力作用	堤体ブロックや基礎岩盤の変位	大規模地震等の外力
漏水	水みち	基礎岩盤内や着岩面沿いの水みち形成	基礎岩盤、着岩部の変状 等
		堤体内の水みち形成	止水板の劣化・損傷、堤体変位による継目の開き・ずれ、各種原因によるクラックの進行
排水異常	基礎排水や継目漏水等の過大な増加		クラック、継目の開き・ずれ等の増大
エフロレッセンス	コンクリート中のセメント由来石灰分等（水に溶解）の表面への移動・蒸発 等		継目や発生したクラック等への水分浸入
鉄筋露出	かぶり減少	かぶりコンクリートの劣化	表面コンクリートのクラック、剥離・剥落、中性化の進行
摩耗	流水作用	流水・土砂によるすり減り	出水、土砂流
剥離・剥落	表面コンクリートの劣化	表面コンクリートの不安定化	各種要因によるクラックの進行
	流水作用	表面コンクリートの不安定化	越流部の不陸等による不安定な水脈、大規模出水、土砂流 等
	外力作用	表面コンクリートの不安定化	地震等
その他（計器不具合など）	経年劣化	計測設備・機器の劣化・老朽化	計器の長期使用
	メンテナンス不足	計測設備・機器の点検・較正等の不足	計器の点検・較正・交換等の不備、経年ダムでの計測継続箇所等の基準の未整備

表- 2.1 より、各事象の発生原因・進行要因は、設計・施工・供用開始後初期、長期にわたる供用期間中の様々な段階に存在すること、1つの事象の中には複数の異なる機構によるものが混在していたり、ある事象が進行して他の事象の発生に繋がるものが少なくないことがわかる。よって、各事象間の因果関係が分かるようフロー図として整理すると図- 2.2 のようになる。

図- 2.2 より、各種劣化・損傷事象の発生・進行過程（機構）は複雑であるが、主な要因としては、温度応力、堤体材料、環境作用、流水作用、偶発外力などがあるこ

とがわかる。よって、これらの要因に着目して図- 2.2 に示される各劣化損傷の主な発生進行過程（機構）を再整理すると、図- 2.3 のようになる。

さらに、図- 2.3 中に示される劣化・損傷の進行過程（機構）を、i)過去の点検等での報告例の多さや、ii)発生・進行のしやすさ及び進行した場合の影響の観点から、同図中に付記したⅠ～Ⅴに分け、これをコンクリートダム堤体等における劣化・損傷機構の類型として整理すれば表- 2.2 のようになる。Ⅱ～Ⅳは経年劣化に伴う進行性のもの、Ⅴは偶発的な外力による損傷である。

このうち本研究の主眼である、長期的にダム本体（堤体）の安定性に影響を及ぼす要因の定量的な評価方法を検討する上で着目すべき劣化・損傷機構の類型は、上記 ii) の観点からその影響を検討する必要性が高く、かつ堤体安定性に関わるものであり、表- 2.2 のⅡ、ⅢおよびⅤがこれに該当する。

よって、ダム本体（堤体）の劣化・損傷の進行度合いを診断する手法やその結果に基づくダム本体の安定性評価の方法についての検討は、これら3つの種類の劣化・損傷を想定して行うこととした。この検討については、

3. に述べる。

なお、表- 2.1 において劣化・損傷事象の1つとした安全管理用計測計器の不具合については、それ自体ダム堤体自体の安全性を変化(低下)させるものではないが、劣化・損傷の兆候の検知や進行度の評価を困難にするものである。したがって、上記の検討とあわせ、これら計器の劣化（老朽化）等による問題が生じやすい長期供用ダムでの安全管理の在り方について明確化する必要がある。この検討については4. において述べる。

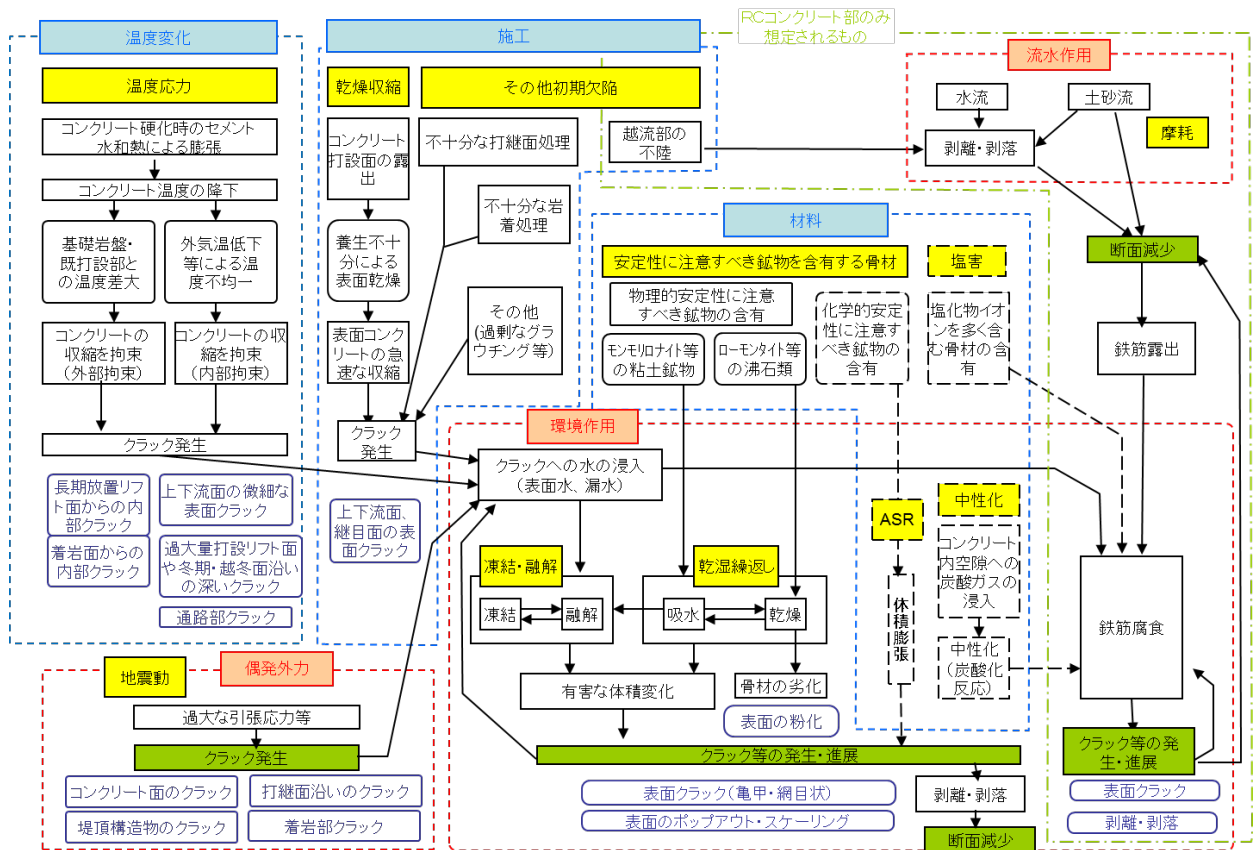


図- 2.2 コンクリートダム堤体等において想定される劣化・損傷機構

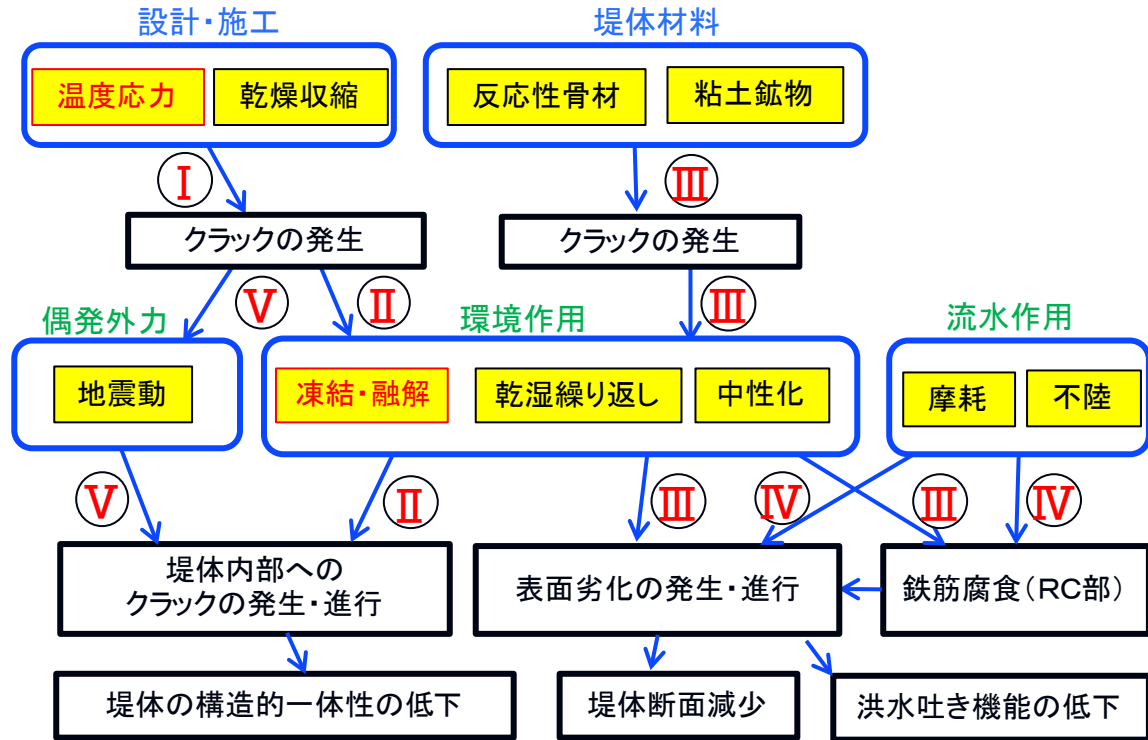


図- 2.3 コンクリートダム堤体の劣化・損傷機構（類型化）

表- 2.2 コンクリートダム堤体等において想定される主な劣化・損傷機構の特徴（類型）

主な劣化・損傷機構の類型	i) 過去の報告例の多さ ◎：報告例が多い ○：一部のダムで報告例あり △：報告例が少ない	ii) 発生・進行しやすさ、 進行した場合の堤体安定性への影響の程度 ◎：堤体安定性への影響が大きい ○：短期間に堤体の安定性へ及ぼす影響は小さい △：直接は堤体へ及ぼす影響は小さい
I. 表面の温度クラック 竣工後初期の温度低下過程において、堤体表面に発生するクラック	◎温度規制計画では内部クラックの防止に重点が置かれていることもあり、報告されるケースは多い。	△水分浸入や経年の温度変化による多少の進行は想定されるが、連続性のあるクラックとなりにくいと考えられる。
II. 堤体内部の進行性クラック 堤体内部に及ぶ水平打継面沿いのクラックなど、温度応力等起因して発生したクラックで、貯水の浸入や気象作用を受けて進行する恐れのあるクラック	○一部のダムで、打継面沿いからの漏水が報告されるケースがある。	◎長期放置リフト面など強度・水密性の面で連続性のある潜在的弱面に起因するクラックが含まれる。特に寒冷地では凍結融解作用による進行が問題となる可能性がある。
III. 堤体表面の進行性劣化 堤体材料（骨材）やコンクリートの乾燥収縮による堤体表面の劣化により発生・進行するクラック	△問題となるケースは少ない。材料選定や配合設計、施工時に注意が払われている。	○堤体表面から徐々に劣化が進行することにより長期的に断面減少を生じる可能性がある。ただし、堤体厚さを考慮すれば、安定性の低下への影響は緩慢と考えられる。
IV. 流水作用による劣化 摩耗や不陸に起因して生じる洪水吐きコンクリートのすりへりや剥離など	○長期供用に伴い、一定の事例はある。	△主として洪水吐き部で生じるものであり、堤体の安定性に影響を及ぼす可能性は低い。ただし進行性の劣化であり、放流機能に影響を及ぼす可能性がある。
V. 大規模地震による損傷 偶発外力の作用に伴う他原因による既発生クラック等の進行	△天端高欄や張り出し部などを除き、国内ダムでは、堤体本体で大きな損傷が報告された事例はない。	◎発生頻度は低いが、大規模な地震により、竣工後初期や供用中の経年劣化により発生した各種のクラックが、急激に進展すれば、堤体安定性に影響を及ぼすことも考えられる。

3. 劣化・損傷がダム堤体の安全性に及ぼす影響の定量的評価方法の検討

3.1 実測挙動解析によるダム堤体の健全度診断方法の検討

コンクリートダム堤体の健全度診断は、シュミットハンマーによるコンクリート表面の強度推定、赤外線による剥離等の劣化状況の調査、超音波によるクラック深さの調査等の非破壊による表面付近の調査法と、ボーリングやつば掘りなどコンクリート内部の状況を直接確認する調査法を必要に応じて組み合わせて行われている。なお、これらの調査手法は、いずれも局所的な劣化診断調査（詳細調査）であり日常点検や定期検査⁹⁾などにおいて目視でクラック等の変状が発見された箇所を対象に行われる調査である。今後、供用開始後長期間経過する管理ダム数がさらに増加することを考えると、多くの管理ダムの健全度診断をより効率的に行うことが求められる。また、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震のように強い揺れが広範囲に及ぶ大規模地震時には、多数のダムの安全性をできるだけ早期にかつ定量的に把握することも重要となる。

このようなことから、定期的な点検の実施において、ダム堤体の経年的な状態の変化を継続的に監視したり、あるいは大規模地震動後の点検において、ダム堤体への影響を迅速に捉えたりするために、詳細調査の必要性を判断するための一次スクリーニング手法として、長期にわたって同一手法で継続して適用可能な、ダムの健全度診断手法を開発していく必要がある。

そこで、このような課題に対応する一つの方法として、ダムの常時微動を計測することで、その劣化・損傷に伴う剛性の低下を振動特性の変化としてとらえる方法のダム堤体の健全度診断への適用可能性について検討を行うものである。

常時微動は、自然や人為による不確定な原因によって生じる地盤の雑振動である。近年、この常時微動をビルや家屋等構造物の振動として計測することにより、固有振動数などを指標として、その剛性の低下に伴う振動特性の変化から地震による被災レベルや老朽化による劣化度を評価しようとする試みが増えてきている。

ダムを対象として常時微動計測を行った例としては、アーチダムを対象としたものとして、その振動特性を詳細に分析した事例⁹⁾や、竣工時の振動特性実験結果と比較してダム堤体の健全性を評価した事例⁹⁾がある。また、地震により被災した海外の重力式コンクリートダムにお

いて、各堤体ブロックの被災レベルと常時微動計測結果が対応していることが確認された報告⁹⁾がある。

なお、本研究では基本的に重力式コンクリートダムを対象とする。これは、同型式のダムがわが国の比較的大規模なダムとして建設事例が多いこと、及び一定の計測事例のあるアーチダム（その構造上比較的振動特性の変化が検知しやすいと考えられる）と異なり先行研究がほとんどないことによる。

3.1.1 堤体の劣化・損傷に伴う振動特性の変化の推定

常時微動計測によりダム堤体の健全度診断を行うためには、堤体内の劣化・損傷の進行によってダムの振動特性（固有振動数等）がどのように変化するかを把握しておく必要がある。しかし、これまでに重力式コンクリートダムを対象に、その経年的な劣化や損傷の発生による健全性の変化をダム堤体の振動特性の変化から実際に捉えた例は見当たらず、実ダムにおける長期的な常時微動計測のデータの蓄積がない。そのため、本研究ではまず、ダム堤体における劣化・損傷がダムの振動特性に及ぼす影響を予測するための予備的検討として、2.で整理した劣化・損傷機構のうち、進展した場合にダムの安定性への影響が特に大きいと考えられる打設面沿いの水平クラックのほか、長期的に進行する可能性のある堤体の表面劣化を想定し、ダム堤体の固有振動数の変化を数値解析により分析した。

(1) 水平クラック進展による振動特性の変化の推定

ここでの検討では、堤体部の振動特性に着目するため、堤体（ダム高100m）のみをモデル化し、岩盤は考慮しないこととした。堤敷面の境界条件は、水平方向及び鉛直方向ともに固定とした。貯水位はダム高の90%とし、貯水は非圧縮性流体としてモデル化した。堤体内の水平クラックはEL.30m, EL.60m, EL.90m（EL.0mを堤敷面標高とする）の3標高のいずれかに想定した。図-3.1に解析モデルと想定する水平クラックの設定標高を示す。

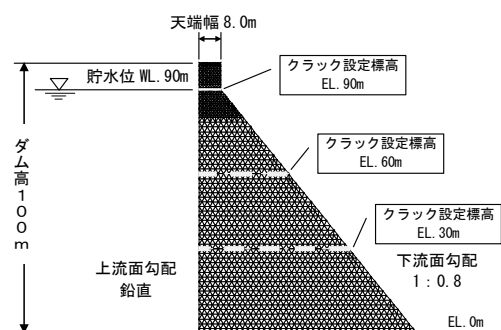


図-3.1 解析モデル（水平クラックを考慮）

堤体コンクリート部及び水平クラック部の物性値は表-3.1に示すとおり設定した。堤体コンクリート部の物性値は、既設の重力式コンクリートダムに使用されている一般的な値を設定した。水平クラックによる影響については、水平クラック部にジョイント要素を設け、その剛性を低下させることにより考慮する方法と、水平クラックに相当する位置のコンクリート（ソリッド要素）の剛性を低下させることにより考慮する方法が考えられる。以下では、まず前者の方法で検討を行い、両方法による結果を比較するために、主要なケースについて後者の方法でも解析した。なお、水平クラック部の剛性の低下は、ジョイント要素を用いた方法では、その軸剛性を低体コンクリート（健全部）の1/10相当に、ソリッド要素の剛性を低下させる方法では、その弾性係数を堤体コンクリート（健全部）の1/10相当にすることによって考慮することとした。

表-3.1 堤体コンクリート部の物性値

		項 目	設定値
健全部	堤体部 ソリッド要素	弾性係数 $E_c(N/mm^2)$	29,000
		ポアソン比 ν	0.2
		単位体積質量 (kg/m^3)	2,300
クラック	ジョイント 要素	軸剛性 $kn(N/mm^2)$	2,900
		せん断剛性 $ks(N/mm^2)*$	1,200
	クラック部 ソリッド要素	弾性係数 $E(N/mm^2)$	2,900
		ポアソン比 ν	0.2
		単位体積質量 (kg/m^3)	2,300

*せん断剛性は軸剛性 Kn の値から弾性論で求まる値とした。

ジョイント要素を用いた解析ケースは、水平クラックの想定位置・形態、標高、深さの組合せにより、表-3.2に示すとおり設定した。ケース1、2では表-3.2中の位置・深さの連続したクラック、ケース3では表-3.2中の位置・深さの断続的な（ミシン目状）クラックを想定した（図-3.2）。なお、クラック部分を当該部のコンクリートの剛性低下で考慮する方法では、EL. 30 m、EL. 60 m、EL. 90 m の各標高に下流面からの連続した水平クラックを想定した3ケースで解析を実施した。

表-3.2 解析ケース

ケース 番号	クラック想 定位置・形態	クラック 想定標高	クラック深さ () : クラック想定標高に おける堤体幅	クラックの 設定方法	
				ジョイント 要素 (剛性低下)	ソリッド 要素 (剛性低下)
1	上流面のみ	EL. 30m	0m~51m (56m)	○	—
		EL. 60m	0m~29m (32m)		
		EL. 90m	0m~7m (8m)		
	下流面のみ	EL. 30m	0m~52m (56m)	○	○
		EL. 60m	0m~30m (32m)		
		EL. 90m	0m~7m (8m)		
2	上・下流面	EL. 30m	0m~51m [※] (56m)	○	—
		EL. 60m	0m~31m [※] (32m)		
		EL. 90m	0m~7m [※] (8m)		
3	断続 (ミシン目 状)	EL. 30m	2m, 4m, 8m 間隔 (56m)	○	—
		EL. 60m	2m, 4m, 8m 間隔 (32m)		
		EL. 90m	1m, 2m 間隔 (8m)		

※上流面と下流面のクラック深さは同一値とした
(表中の値はそれぞれの水平クラックの深さの合計)。

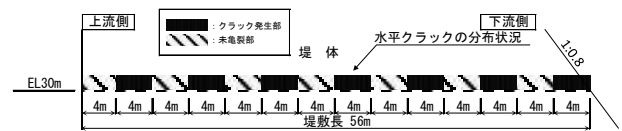
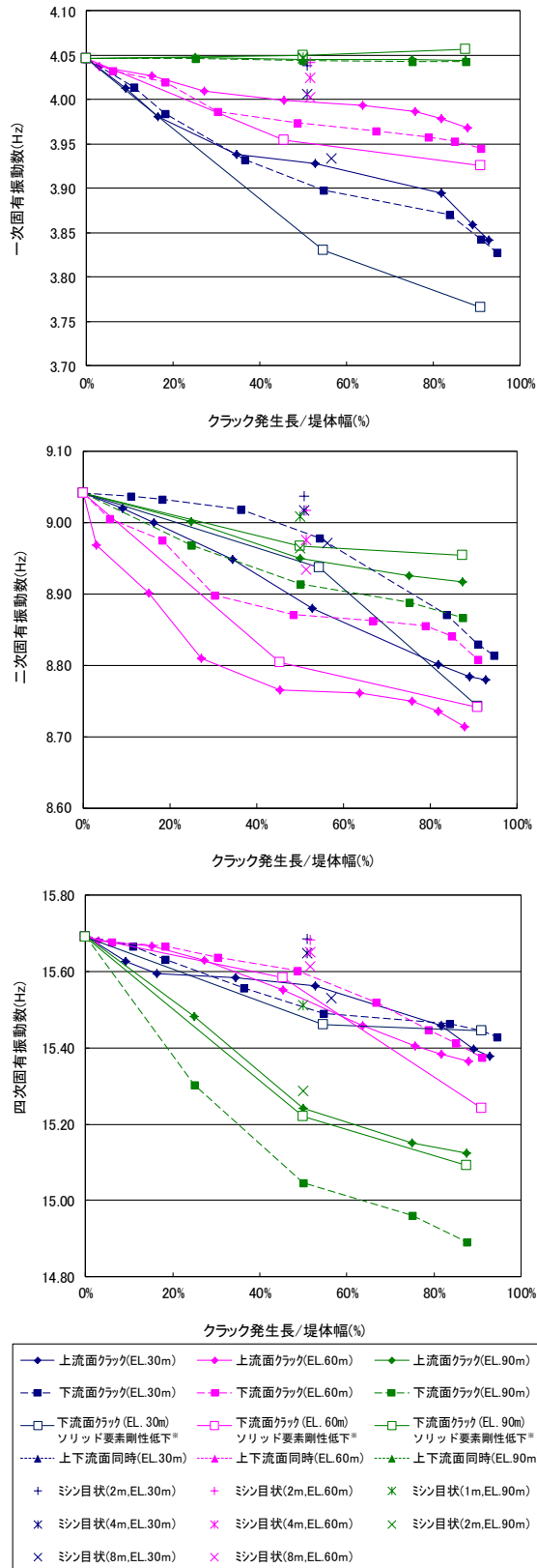


図-3.2 ミシン目状クラックの設定例（模式図）

各ケースの固有値解析結果から得られた上下流方向振動の卓越モードである一次モード、二次モード、及び四次モードの固有振動数をそれぞれ図-3.3に示す。水平クラックによる堤体固有振動数への影響は、この3つの振動モードで異なり、低標高部にクラックを想定した場合にはより低次のモードにおいて、高標高部にクラックを想定した場合にはより高次のモードにおいて、その影響（固有振動数の減少）が相対的に顕著になる傾向がみられる。すなわち、低標高部にあるクラックは、重力式コンクリートダムの上下流方向振動モードとして一般的に卓越する一次モードの固有振動数の変化により捉えられる可能性が高いため、他の振動モードとの分離は比較的容易と考えられる。しかし、高標高部のクラックはより高次の振動モードのうち特定の振動モードの固有振動数を同定して、その変化を検知する必要があることになる。また、ミシン目状の断続的なクラックがある場合は、合計長さが同じ連続したクラックがある場合よりやや固有振動数の減少量が小さくなり、断続的な水平クラックの間隔が短くなれば、その影響はさらに小さくなることもわかる。これより、常時微動計測により捉えることのできる堤体内部のクラックはある程度連続したものに限定されると考えられる。

なお、クラック部をコンクリート部（ソリッド要素）の剛性を低下させた解析から得られる固有振動数の値は、同じ位置・範囲のジョイント要素の剛性低下を考慮した解析から得られる値と異なるものの、クラックの長さに伴う固有振動数の減少傾向についてはほぼ同様であることが確認された（図-3.3中 白抜き□ソリッド低下EL. 30 m、EL. 60 m、EL. 90 m の3ケース）。



※凡例中白抜き□のみ、水平クラック直下に接するコンクリート部の剛性を低下させた解析結果。他はジョイント要素の剛性を低下させた解析結果。

図- 3.3 水平クラックに伴う固有振動数の変化

(2) 表面劣化による振動特性の変化の推定

解析モデル、入力物性値等は、前述のダム高 100 m のモデルと同様とした。ただし、表- 3.3 左に示す堤体表面からの劣化深度を表現するためにメッシュの修正を行った。

ここで、堤体コンクリートの表面劣化は、表- 3.3 右に示すように堤体表面部の剛性を低下させることで考慮した。

表- 3.3 解析ケース（表面劣化）

表面劣化深度※	劣化部剛性
1.0m	0.8Ec
3.0m	0.5 Ec
5.0m	0.1 Ec
10.0m	

※Ec は堤体コンクリート（健全部）の弾性係数

※表面劣化深度は表面から直交方向とした。

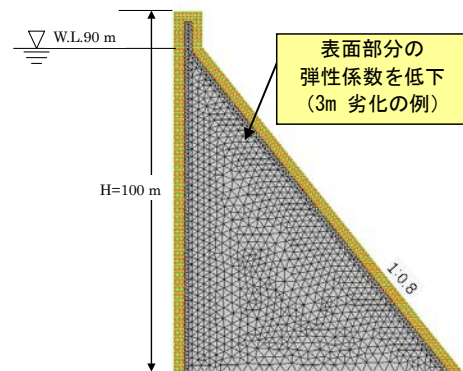


図- 3.4 解析モデル（表面劣化を考慮）

図- 3.5 に解析の結果を示す。剛性の低下率が大きくなるほど、また劣化深度が大きくなるほど固有振動数が減少することがわかる。なお、振動モードの次数で比較すると高次のほうが固有振動数の減少量が大きくなる。たとえば劣化部の弾性係数が健全な状態から 80 %まで低下したと想定した場合の一次の固有振動数の減少は、表面から 3 m 劣化した場合に 0.12 Hz、10 m 劣化した場合に 0.3 Hz であり、同様の弾性係数における 2 次の固有振動数の減少は、表面から 3 m 劣化した場合に 0.36 Hz、10 m 劣化した場合に 0.63 Hz である。よって表面劣化の進行度を常時微動計測により診断しようとする場合には、比較的検出が容易な一次固有振動数だけでなく、より高次の振動モードの固有振動数についても検出できることが望ましい。

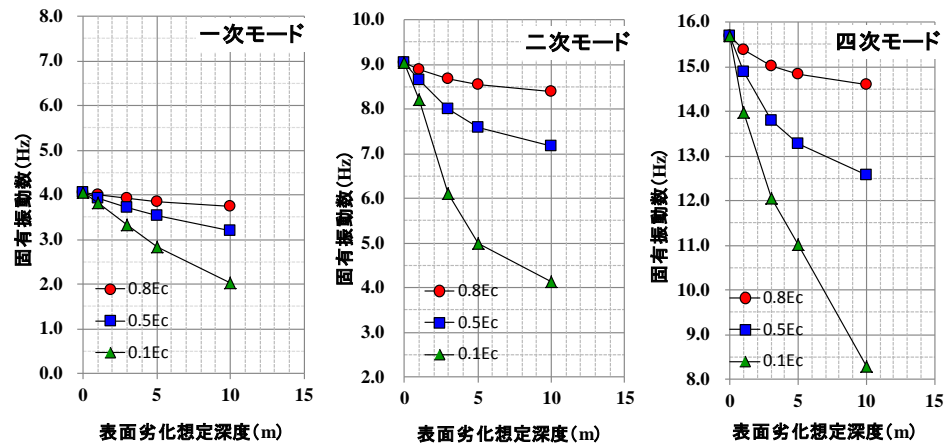


図- 3.5 表面劣化に伴う固有振動数の変化（固有値解析）

3.1.2 実ダムでの常時微動計測によるダム堤体の振動特性の把握

(1) 計測の目的

ダムの劣化・損傷による振動特性の変化を常時微動計測によって捉えるためには、劣化損傷によって生じる振動特性の変化を分離する必要がある。このため、特にダムの振動特性に影響を与える可能性のある主な要因として、①付加質量効果をもたらす貯水（貯水位）の変動、②堤体コンクリートの体積変化を生じさせる温度変化を想定し、これらがダム堤体の振動特性に与える影響を把握することを目的として、複数の重力式コンクリートダムにおいて常時微動計測を行った。なお、このほか③堤体の補強対策が振動特性に及ぼす影響を把握することを目的とした計測も行った。

常時微動計測を行ったダムの諸元とその目的（観点）を表- 3.4に示す。

試験湛水中のAダムでは、貯水位が空虚の状態から最高水位まで連続的に変化する時期での計測により、貯水位の変動に伴うダムの固有振動数の変化を分析した。

年間の貯水位変動が比較的小さいBダム（供用後約45年）においては、年間の気温・水温変化に伴う堤体コンクリートの体積変化が継目の挙動に影響を及ぼすことを想定し、温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響を分析した。

打設面の強化を目的として、一部のブロックで堤体上部からの鉄筋挿入工等を実施したCダムでは、補強対策の前後での振動特性変化に着目し分析した。

表- 3.4 常時微動計測実施ダムとその目的

ダム	構造型式	ダムの諸元				計測の目的
		竣工年	ダム高	堤頂長	堤体積	
Aダム	重力式コンクリートダム	2012	119m	320m	1,020,000m ³	貯水位変動が堤体の固有振動数等に及ぼす影響の把握。
Bダム		1966	33.7m	140m	40,000m ³	年間の温度変化が堤体の固有振動数等に及ぼす影響の把握。
Cダム		1975	42.0m	138.0m	80,000m ³	補強対策が堤体の固有振動数等に及ぼす影響の把握。

(2) 常時微動の計測および計測データの分析方法

ダム堤体における常時微動の計測とその結果の解析は、①常時微動計測装置の設置、②常時微動計測の実施、③振動波形の抽出、④周波数スペクトル解析、⑤固有振動数の推定の手順で行った（図- 3.6）。

なお、常時微動の計測には高精度サーボ加速度計（加

速度センサー）及びバッテリーが内蔵されたポータブル型計測装置を使用した。本装置は、3成分型（垂直1成分、水平2成分）の振動を計測することができる。また、本装置は持ち運びが容易な構造となっており効率的に多数の計測を行うことができる。

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

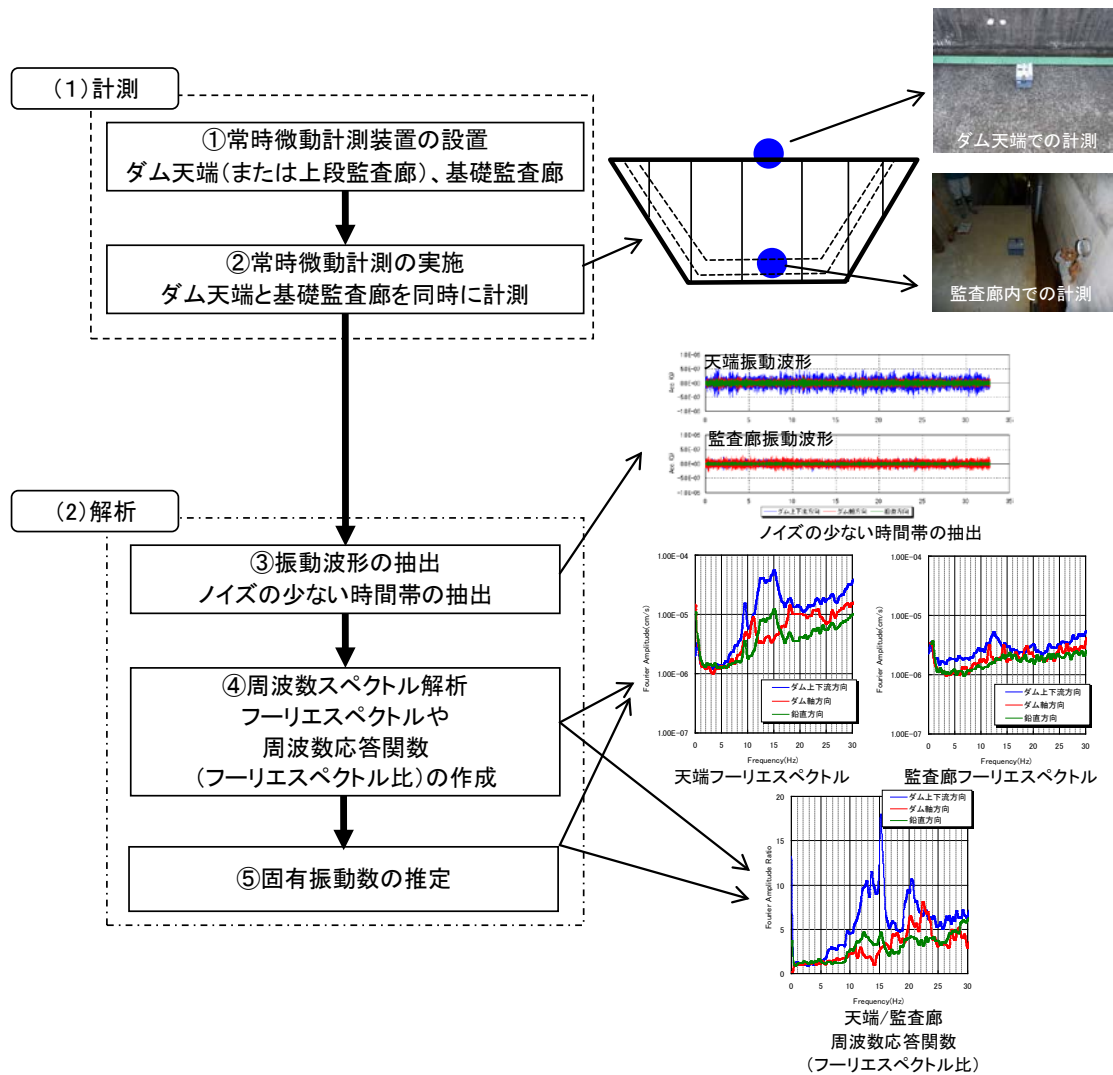


図- 3.6 常時微動計測と解析の流れ

(3) 貯水位変動がダムの固有振動数に及ぼす影響の検討 (Aダム)

貯水位変動がダムの固有振動数に及ぼす影響を調べるため、試験湛水により貯水位上昇中の A ダムにおいて計 14 回の計測を実施した (表- 3.5)。計測位置は、図- 3.7 に示すとおり、ダム中央付近の上段監査廊と基礎監査廊であり、基礎岩盤からの高さは、上段監査廊が 102 m、基礎監査廊が 7 m である。

表- 3.5 計測時の貯水位・気温 (A ダム)

日付	貯水位 (EL. m)	気温※ (℃)
2011/11/28	571.0	4.7
2012/2/10	627.0	-3.2
2012/3/2	631.5	0.6
2012/3/16	639.1	1.1
2012/4/11	652.8	9.1
2012/5/1	664.8	14.9
2012/6/15	680.7	16.2
2012/6/20	684.0 (S. W. L.)	20.8
2012/9/7	667.1	20.0
2012/10/31	634.7	6.6
2012/11/14	620.2	5.7
2012/11/29	613.0 (L. W. L.)	2.2
2013/1/29	621.8	-1.2
2013/2/13	624.5	0.0

※最寄りの気象観測地点の日平均気温

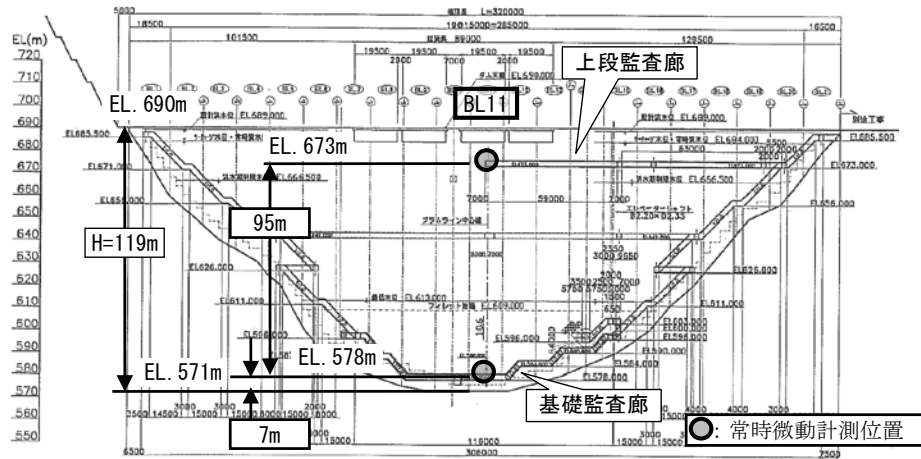
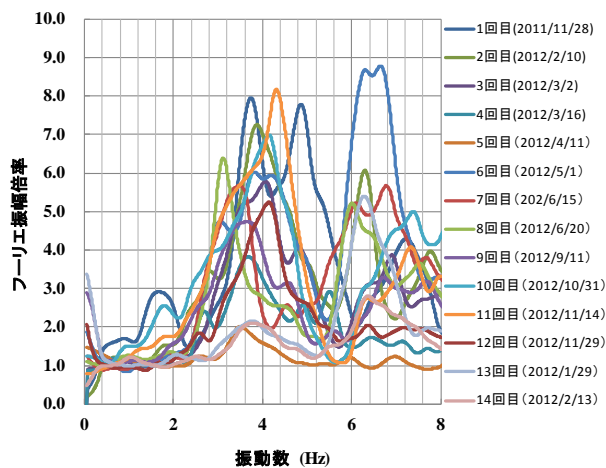


図- 3.7 常時微動計測位置 (A ダム)

図- 3.6 の手順に従い、上段監査廊、基礎監査廊それぞれで得られた常時微動（加速度時刻歴）データからフーリエスペクトルを算出し、上段監査廊／基礎監査廊の周波数応答関数（フーリエスペクトル比）を求めた。周波数応答関数は、基礎地盤に対する堤体の相対的な振動（即ち堤体の振動特性）を示していると考えられる。

A ダムにおいて実施した計 14 回の計測結果で得られた最大断面（BL. 11）についての周波数応答関数（重力式コンクリートダムの振動のうち卓越すると考えられる上下流方向成分の振動に対するもの）を図- 3.8 に示す。

図- 3.8 常時微動計測から求めた周波数応答関数
(A ダム 最大断面 上下流方向振動)

現地計測結果より推定した一次固有振動数（上下流方向）と計測時の貯水位の関係を図- 3.9 に示す。図中に

は、A ダムと同形状の 2 次元有限要素モデルによる固有値解析から得られた一次固有振動数の推定結果も示している。計測で得られた固有振動数にはばらつきがみられるものの、解析で得られた傾向と全体的には整合しており、貯水位が満水位の 50%程度に相当する水位より上昇すると固有振動数比が次第に減少する傾向が見られる。

なお、計測による推定値には貯水位変動以外の各計測時の計測条件の違いによる影響も含まれている可能性もあるが、堤体の振動特性に影響を及ぼすと考えられる貯水位条件が空虚から最高水位付近まで大幅に変化しているため、貯水位変動による影響が大きいと考えられる。

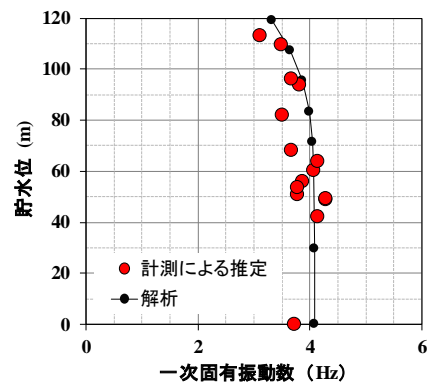


図- 3.9 貯水位と固有振動数の関係 (A ダム)

また、計測により推定した一次固有振動数と気温の関係を図- 3.10 に示す。一般に、気温が下がると堤体コンクリートが収縮し、横継目が開くことなどにより堤体の剛性が低下し、固有振動数は減少するものと考えられる。しかし、A ダムにおけるこれまでの計測ではそのような

傾向は認められない。この理由としては、試験湛水中のダムであり、貯水位変動幅が大きくその影響が支配的であること、また堤体コンクリートが最終安定温度に達しておらず、気温変化による影響が表れにくいことなどが考えられる。

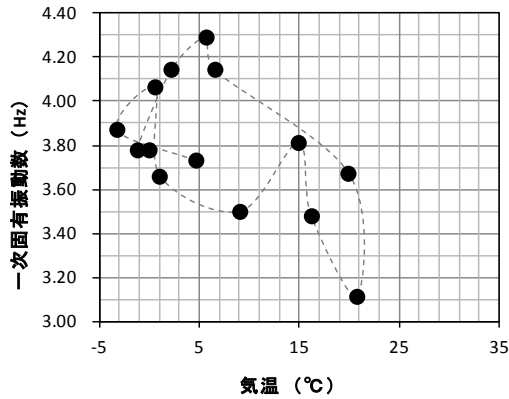


図- 3.10 常時微動計測により推定した固有振動数と気温の関係 (A ダム)

(4) 温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響の検討 (Bダム)

堤体コンクリートは、気温・水温の変化により体積変化を生じるため、堤体継目部などの挙動を通じ、常時微

動として計測される堤体の固有振動数に影響を及ぼす可能性がある。そのため、温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響を調べることを目的にBダムで常時微動計測を実施した。なお、本検討での温度はBダム最寄りの気象観測地点で年間を通じて観測されている外気温の各月の平均気温を適用した。

常時微動の計測位置を図- 3.11 に示す。計測位置の基礎岩盤からの高さは、天端が 33.7 m、基礎監査廊が 3.2 m である。

計測は表- 3.6 に示す日程で計 7 回実施した。

表- 3.6 計測時の貯水位・気温 (Bダム)

日時	貯水位 (EL.m)	気温※ (°C)
2011/9/12	274.46	28.1
2012/2/17	276.67	-0.4
2012/9/14	—	24.8
2012/10/19	275.54	14.9
2012/11/16	276.91	10.2
2012/12/14	—	3.0
2013/2/14	277.90	5.0

※最寄りの気象観測地点での日平均気温

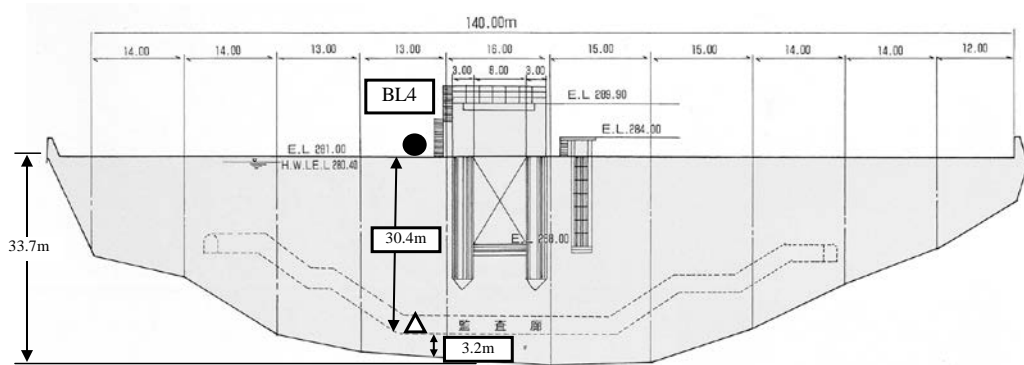


図- 3.11 常時微動計測位置 (B ダム)

各計測回における計測結果より得られた上下流方向の周波数応答関数 (天端/基礎監査廊) を図- 3.12 に示す。

いずれの計測結果についても、15 Hz 付近に一次固有振動数と推定される振動数のピークがみられる。なお、図- 3.12 より一次固有振動数と推定される卓越振動数を時系列で整理した (図- 3.13)。図中 (b) の赤破線は、年間の温度 (気温) 変化をサインカーブと仮定し、固有

振動数の変化が温度変化に対応していると仮定して求めた以下に示す最小二乗法による近似曲線である。

$$f_1 = 0.76 \sin(2\pi t / 365 - 1.63) + 15.49 \quad (1)$$

ここに、 f_1 :一次固有振動数 t : 月日 (年初=0)

計測回数が限られているものの、常時微動計測から推定される上下流方向の一次固有振動数は、夏季では高く

15.8 Hz (11/09/02)、冬季は15.0 Hz (12/02/17) まで減少し、両者で0.8 Hz の差が生じている。図- 3.13 (b) に示した近似式 (1) 式) によれば、一次固有振動数は年間最大で、1.5 Hz 程度変化している可能性がある。

なお、常時微動計測からの固有振動数の推定値には、貯水位変化の影響が含まれている可能性がある。このため、B ダムと同形状の2次元要素モデルを用いた数値解析(固有値解析)を行い、夏季と冬季の水位差による影響を調べた。夏季(第1回計測時)と冬季(第2回計測時)の貯水位を対象に実施した解析の結果を表- 3.7 に示す。夏季から冬季にかけて、貯水位2.21 mの上昇に伴う一次固有振動数の変化は-0.4 Hz (減少) となった。計測で得られた夏季から冬季へ固有振動数の減少量(約0.8 Hz)は、水位上昇による固有振動数の減少量(0.4 Hz)よりも大きいことから、計測で得られた固有振動数の季節変化には、貯水位変動以外の影響が含まれているものと推定される。気温変化に伴って堤体コンクリートが膨張・収縮することにより、堤体ブロック間の継目の密着性が変化したことが一因と考えられる。

振動モード	固有振動数 (Hz)		
	夏季水位 EL.274.46 m	冬季水位 EL.276.67 m	差分 (夏季水位 →冬季水位 +2.21m)
一次	13.71	13.32	-0.39
二次	29.30	29.11	-0.19
三次	36.79	36.75	-0.04
四次	53.02	52.81	-0.21

なお、これまでに実施した7回の計測のうち冬季の計測結果(第2回、第4回、第5回、第6回、第7回)において、に夏季(第1回、第3回)では確認されない上下流方向の振動数のピーク(7~11 Hz 付近)が見られた(図- 3.14)。

この冬季特有のピーク(卓越振動数)について気温との関係を図- 3.15 に示す。同図中には図- 3.13 と同様サインカーブによる近似曲線も示している。図- 3.15 より、この冬季のみにみられるピークも外気温との相関がみられ、放流水や機械振動によるものではなく、構造物の季節的な振動特性の変化によるものと考えられる。このピーク振動数は表- 3.7 に示す固有値解析から得られた一次固有振動数(13.3~13.7 Hz)に比べかなり小さい。このため、堤体そのものではなく堤体上の構造物の振動など、その他の要因によるものである可能性がある。今後とも計測を継続しつつその原因について検討する予定である。

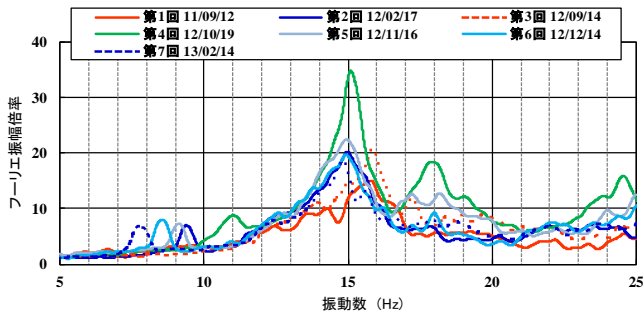


図- 3.12 周波数応答関数 (B ダム 上下流方向)

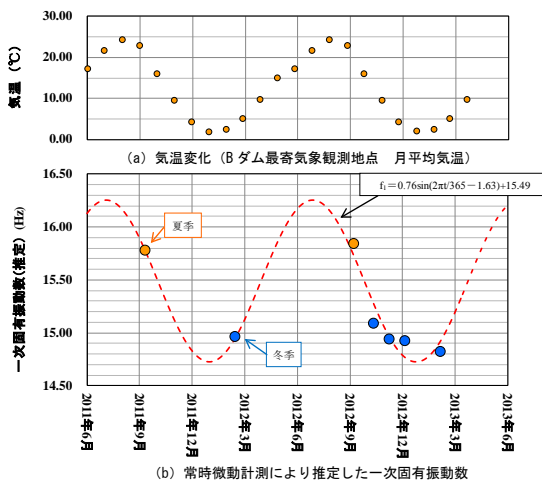


図- 3.13 気温・固有振動数の変化 (B ダム)

表- 3.7 固有値解析結果 (B ダム)

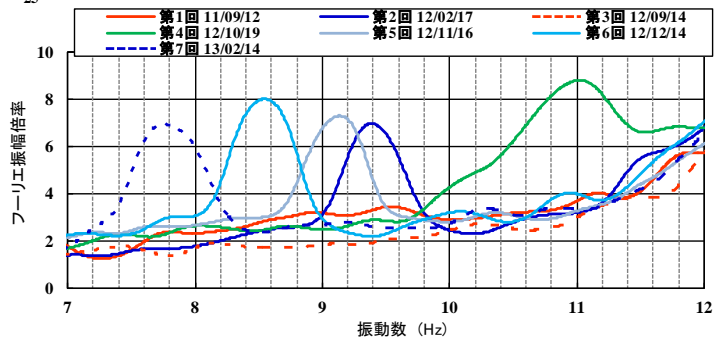


図- 3.14 冬季のみみられる振動数のピークとその変化 (B ダム 周波数応答関数)

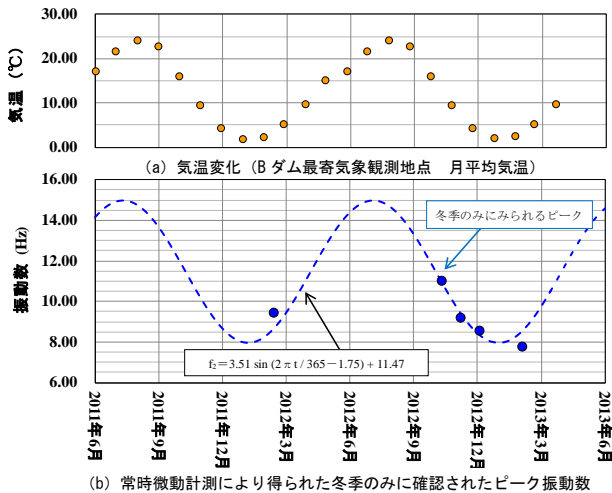


図- 3.15 冬季のみみられる振動数のピークの変化
(B ダム)

(5) 堤体補修がダム堤体の固有振動数に及ぼす影響の検討 (Cダム)

C ダムでは、その一部のブロックの打設面の強化を目的として堤体上部からの鉄筋挿入工を実施している(図- 3.17)。この対策前後における固有振動数の変化を調べることが目的として常時微動計測を実施した。

計測は対策を実施したブロック (BL.2) を対象に行った。当該ブロックは堤体端部のブロックで、その平面形状は扇形をしている。また底部形状も斜面に沿って切れ上がっている。

表- 3.8 計測時の貯水位・気温 (C ダム)

回数	日時	貯水位 (EL.m)	気温※ (°C)	備考
第1回	2011/ 1/10	219.6	6.0	対策前
第2回	2012/10/11	226.4	20.8	対策後
第3回	2013/ 2/19	229.9	2.4	対策後

※最寄りの気象観測地点での日平均気温

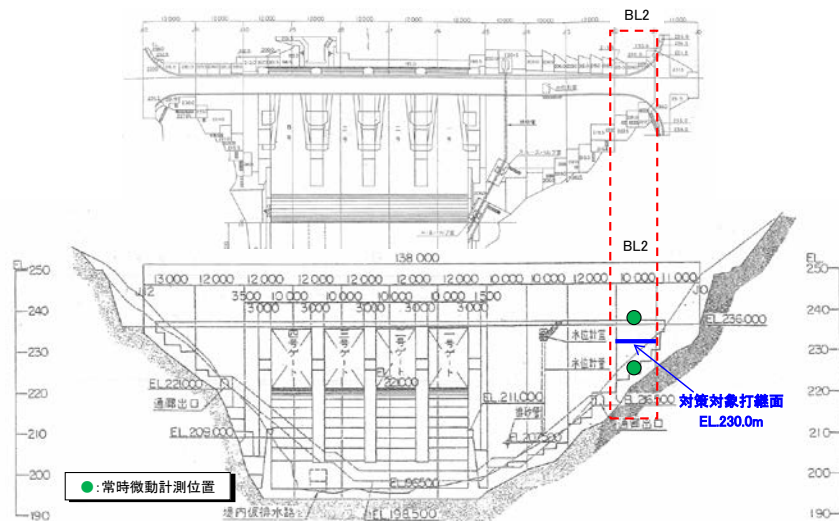


図- 3.16 常時微動計測位置(C ダム)

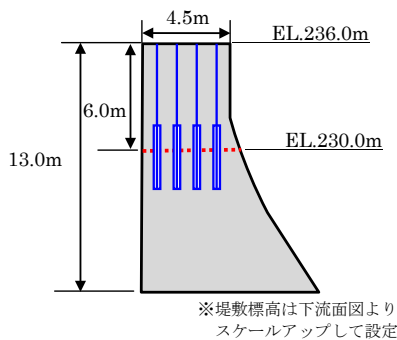


図- 3.17 打設面補強のための鉄筋挿入工(C ダム)

図- 3.18、図- 3.19に対策前(第1回)および対策後(第2回、第3回)の計測による上下流方向振動のフーリエスペクトルおよび周波数応答関数(天端/基礎(フーチング))を示す。計測対象ブロック中央部での上下流断面をモデル化した2次元有限要素モデルでの固有値解析の結果(表- 3.9)を参考に25 Hz 付近の振動数のピークに着目すると、第1回計測(対策前)では天端、周波数応答関数ともに28.0 Hz に、第2回計測(対策後)では同様に29.9 Hz にピークが、第3回計測(対策後)では、26.6 Hz、30.0 Hz 付近にピーク確認された。

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

固有振動数に影響を与える要因は主に、貯水位、気温、対策の有無と考えられることから、対策前の第1回計測時を基準とした場合に、各要因が固有振動数に与える影響を整理すると表-3.10のようになる。第1回計測から第2回計測の固有振動数の増加(1.9 Hz)は、気温および対策の2つの要因の影響によると考えられる。第3回目の計測では、一次固有振動数と考えられる卓越振動数の候補が2つ(26.6 Hz、30.0 Hz)存在し、いずれが一次固有振動数であるかによって解釈が異なる。第1回計測時より卓越振動数の低い26.6 Hzが一次固有振動数であった場合には、気温および貯水位の影響が卓越したと考えられ、第1回計測時よりも卓越振動数が高い30.0 Hzが固有振動数であった場合には、対策の影響(効果)が卓越した可能性がある。しかしながら、計測データが

限られており、本ケースでは固有振動数の経時的变化を定量的に推定するのは難しい。また、**3.1.1**で考察したように、打継面の状態の変化が堤体の振動特性に与える影響は、一次固有振動数のみに着目したのでは、検知が難しい可能性もある。

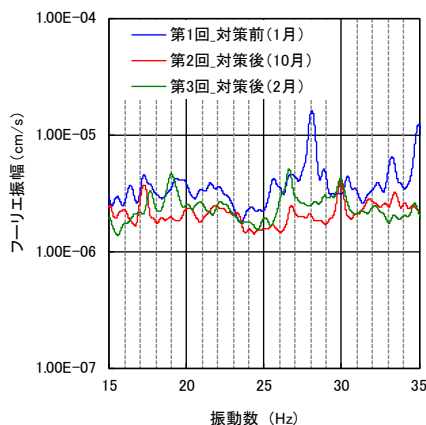
いずれにしても、本ケースのようにダム堤体の補強対策による剛性の変化(回復)を常時微動計測により推定された固有振動数の変化により捉えられるかどうかを検討する場合には、貯水位や気温の影響が定量的に評価・分離できるよう、対策前後の一定期間計測を行う必要があると考えられる。これは、劣化・損傷の進行による剛性の低下を固有振動数の変化で捉えようとする場合も同様と考えられる。

表- 3.9 固有値解析結果 (Cダム)

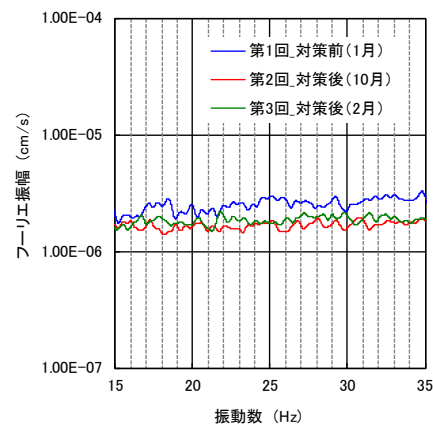
	日時	貯水位 (EL. m)	貯水深 (m)	固有振動数 (Hz)			
				一次	二次	三次	四次
第1回 (対策前)	2012/1/10	WL. 219.6	空虚	25.22	77.31	79.95	152.54
第2回 (対策後)	2012/10/11	WL. 226.4	3.4m	25.22	77.17	79.88	151.12
第3回 (対策後)	2013/2/19	WL. 229.9	6.9m	24.68	72.75	79.20	142.31

表- 3.10 常時微動計測による卓越振動数および要因が固有振動数に与えると予想される影響 (Cダム)

計測回		第1回計測 (対策前)	第2回計測 (対策後)	第3回計測 (対策後)
条件	貯水位 (EL. m)	219.6	226.4	229.9
	外気温 (°C)	6.0	20.8	2.4
卓越振動数 (計測値)		28.0	29.9	26.6 30.0
想定される 固有振動数の影響 (第1回計測時を基準 とした変化の方向)	貯水位の影響	—	減少	減少
	気温の影響	—	増加	減少
	対策の影響	—	増加	増加



(a) 天端



(b) 基礎 (フーチング)

図- 3.18 常時微動計測による上下流方向のフーリエスペクトル (Cダム BL. 2)

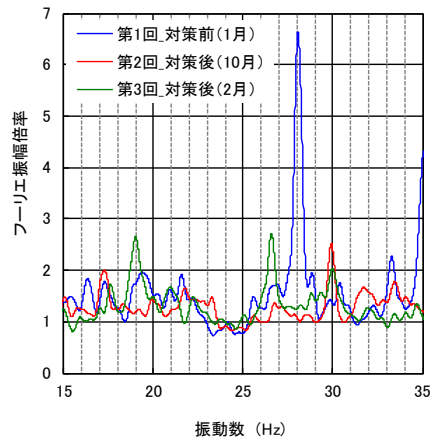


図- 3.19 上下流方向の周波数応答関数 (C ダム)

3.2 現時点までの知見および今後の展望

重力式コンクリートダム堤体の健全度診断手法の1つとして、常時微動計測による方法の適用可能性について、あらかじめ堤体に水平クラックおよび表面劣化を想定したモデルダムの数値解析によりダム堤体の劣化・損傷が振動特性（固有振動数）に与える影響を分析するとともに、固有振動数に影響を与えと考えられる因子の影響度の把握のために実ダムでの常時微動計測を実施することにより検討した。

数値解析結果の分析からは、以下のことが分かった。

- 1) クラックが低標高部にある場合は、上下流方向振動の一次振動モードの固有値振動に変化が現れやすく、この振動数に着目すればよいと考えられる。しかし、高標高部にあるクラックは、より高次モードの固有振動数にも着目する必要がある。
- 2) クラックの位置（上流面、下流面）や連続性の程度によって、ダムの振動特性（固有振動数）への影響は異なる。なお、ミシン目状の細かな断続的クラックは、合計クラック長が同じであっても連続性のあるクラックに比べて、振動特性の変化による検出は難しいと考えられる。
- 3) 表面劣化の固有振動数への影響は、低次の振動モードに比べて高次の振動モードのほうが、固有振動数の減少量が大きくなる。したがって、表面劣化の進行度を常時微動計測により診断しようとする場合には、比較的検出が容易な一次固有振動数だけでなく、より高次の振動モードの固有振動数についても検出できることが望ましい。

また、実ダムでの常時微動計測とその結果の分析により以下のことが分かった。

- 4) ダムの振動特性（固有振動数）は貯水位変動によ

り影響を受ける。

- 5) ダムの振動特性（固有振動数）には年間の周期的変動が見られ、外気温の変化による影響を受けている可能性が高い。
- 6) ダム堤体の補修による剛性の変化（回復）を常時微動計測により捉えるには、対策前後の一定期間計測を行う必要があると考えられる。

ここまでの検討で対象としてきたダムの振動特性に影響を与えと考えられる要因のうち、貯水位や温度の変動と異なり、コンクリートの劣化等によるダム堤体の剛性低下は、経年的（不可逆的）な変化といえる。このため、貯水位や温度によるダム堤体の固有振動数の変動傾向を各ダムにおいて、あらかじめ1～2年程度の計測により同定しておけば、その後の定期的な常時微動計測により得られる固有振動数を指標として、ダム堤体の健全性とその変化の有無を評価することが可能になると考えられる（図- 3.20）。なお、過去の地震記録より得られるダム堤体の固有振動数も以前の状態を把握するうえで有効な情報となる可能性がある。

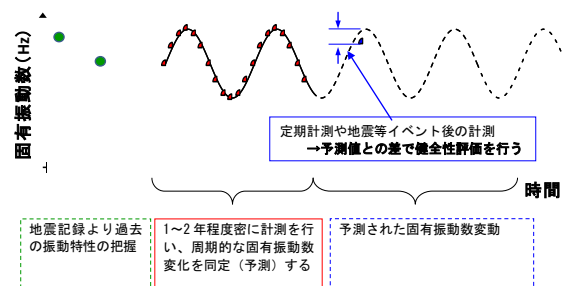


図- 3.20 ダム堤体の健全度診断における常時微動計測の活用方法のイメージ

3.3 劣化・損傷を考慮したダム堤体の安全性評価方法の検討

前節までに述べたダム堤体の振動特性変化に着目した劣化・損傷の診断手法は、ダムの健全度診断のための一次スクリーニング手法の1つに過ぎない。このような診断結果を踏まえ既設ダムの現状及び将来の安全性（ダム堤体の安全性）について定量的な評価を行うには、さらに以下のことが必要と考えられる。

- 1) 一次スクリーニング手法による診断結果を安全管理における目視点検記録や、漏水量、たわみ量、揚圧力など各種の安全管理用モニタリングデータ等と総合し、劣化・損傷の発生・進行が疑われる部位を推定すること
- 2) コア採取等を含む詳細調査を行って、推定部位における劣化・損傷の兆候や進行度合いを可能な限り把握すること
- 3) 把握した劣化・損傷の状況を安全性評価のための各種分析に反映させること。

このうち、本研究では上記 3) に関して、その具体的な方法について以下の2つの方法により検討を進めている。

- ・ 震度法での安全率の低下による評価方法の検討
- ・ 既存クラックが堤体の安定性に及ぼす影響のクラック進展解析を用いた検討

3.3.1 震度法での安全率の低下による評価方法の検討

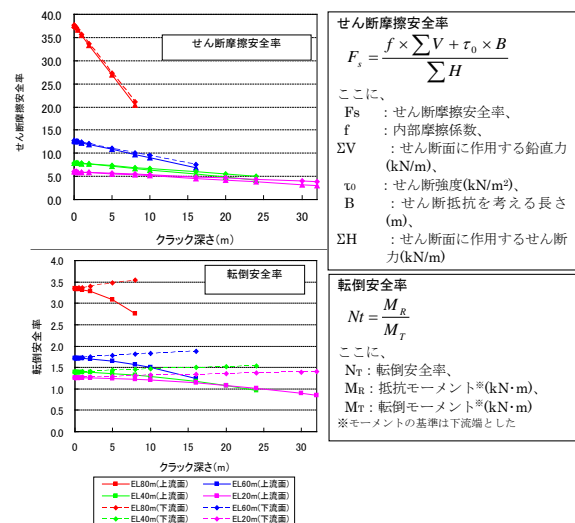
劣化・損傷を考慮したダム堤体の安定性を評価する基礎的手法の検討として、2. で述べた重力式コンクリートダムにおける主な劣化機構のうち、堤体安定性に及ぼす影響の大きな水平クラック及びその他の代表的な劣化損傷として堤体の表面劣化を想定し、その発生・進行がダムの安全性（河川管理施設等構造令⁸⁾に基づく断面設計時の安定計算法（震度法）による滑動（せん断摩擦）安全率及び転倒に対する安全率）に与える影響について検討した。その結果は図- 3. 21、図- 3. 22 のとおりであり、これらから以下のことが言える。

- 1) 一般的な断面形状の重力式コンクリートダムにおいて水平打継面沿いのクラックを考慮した場合、滑動に対する安全率はクラックが深くなるほど低下する。ただし、高標高部のクラックは安全率の低下度は大きいがもとの安全率が大きく、低標高部のクラックはもとの安全率は高標高部ほど大きくないが、クラックが深くなってもその低下度合いが小さ

いため、滑動により堤体の安定性が損なわれる可能性はほとんどない（図- 3. 21）。

- 2) 転倒に対する安全率は上流面の低標高部のクラックが深くなると安全性に影響を及ぼす可能性がある（図- 3. 21）。
- 3) 表面劣化による断面減少を考慮した場合は、考慮しない場合に比べ滑動・転倒に対する安全率はやや低下するが、外部コンクリート厚に相当する比較的深い劣化を想定した場合でも堤体の安定性が損なわれる可能性は低い（図- 3. 22）。

ただし、本検討において考慮している地震力は、構造令に規定されている設計震度相当のものであり、大規模地震に対する安定性は別途検討する必要がある。



※解析モデルの諸元は次の通りとした。堤高：100m、上流面勾配：鉛直、下流面勾配：1：0.8、設計震度 0.12、貯水位：90m、岩盤せん断強度：2.16MPa+tan45°、コンクリート単位体積重量：22.56kN/m³
 ※水平打継面沿いのクラックの設定標高は、着岩からの高さ 20m(図中では EL20m と表記した) 同 40m, 60m, 80m(同じ図中では EL40m, EL60m, EL80m とそれぞれ表記した) の 4 ケースを設定した。各標高をダムの底面と仮定して下流側への滑動・下流端を基準とする転倒の安定計算を行った。
 ※水平打継面沿いのクラックの設定位置は、上流面・下流面とした。
 ※上流側クラックには静水圧と同等の揚圧力を作用させた（揚圧力係数 1.0）。下流側水位は 0 とした。未亀裂部の揚圧力係数は 1/3 とした。

図- 3.21 重力式コンクリートダム堤体に水平クラックがある場合のクラック上部の転倒・せん断摩擦安全率（震度法）

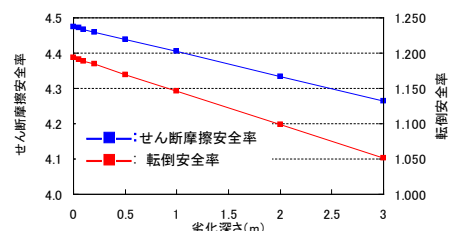


図- 3.22 重力式コンクリートダム堤体下流面の表面劣化を断面減少として考慮した場合の転倒・せん断摩擦安全率（震度法）

3.3.2 既存クラックが堤体の安定性に及ぼす影響のクラック進展解析を用いた検討

前節に述べた安定計算による検討では、ダム堤体に作用する荷重条件は通常の設計で考慮されるものと同等とし、地震荷重については設計震度相当の水平地震力を考慮した。しかし、この水平地震力は、断面設計上考慮される一定の安全率と組み合わせて用いられるものであって、実際の地震時にダムに作用する地震力と必ずしも対応しない。また、極めて長期にわたる供用を想定すると、ダムの耐震性能照査⁹⁾で想定されるような大規模地震動を受けた場合に劣化・損傷がどの程度進行する可能性があるかについても重要な点である。それは、2.で示したように、ダム堤体の安定性を低下させる劣化・損傷機構の1つである偶発外力としての大規模地震動は、さまざまな要因で生じた各種の劣化を急激に進行・拡大させる可能性があるためである。よってここでは、ダム堤体の安定性に及ぼす影響が最も大きいと考えられる劣化・損傷として、3.3.1での検討と同様、あらかじめ堤体内に水平クラックがある重力式コンクリートダムを想定し、大規模地震動に対する耐震性能照査⁹⁾と同様の方法（引張クラックの進展を考慮した非線形動的解析）を用いた以下の検討を行い、劣化・損傷の有無、程度が堤体の安定性に及ぼす影響を定量的に検討した。

- ・ 一定の地震動による既存のクラックの進展範囲の推定
- ・ クラックが堤体を貫通しない限界の地震動強さの推定

(1) 一定の地震動による既存のクラックの進展範囲の推定

本検討は図-3.23に示す重力式コンクリートダム（ダム高 $H=100\text{m}$ ）の二次元有限要素モデル（堤体内にあらかじめ打継面沿いの一部に水平クラックを想定したケースと想定しないケース）を用いて行った。

堤体部分の断面形状は一般的な重力式コンクリートダムを参考に上流面勾配を鉛直とし、下流面勾配は上流端鉛直応力が圧縮側となる条件から1:0.8に設定した。解析モデル上のクラックは、図-3.24に示す通り、あらかじめ堤体内に水平クラックを想定するケースについては、当該クラック部分に非線形ジョイント要素を想定することにより考慮している。また、水平クラックを想定する打継面のクラック部以外の同一標高面全体が強度的に弱部となっていることを想定し、同水平面内の引張強度を周囲より20%低下させている。解析モデルの貯水池部分は非圧縮性流体とした。貯水位は常時満水位状態を

想定して堤高の90%相当とした。

基礎岩盤部分については、モデル境界での反射波の影響を除くため側面に自由地盤を設け、境界条件を仮想仕事の原理に基づく粘性境界¹⁰⁾とした。モデル化範囲は同様の境界条件に基づく既往の解析事例¹¹⁾を参考に設定した。

設定した物性値を表-3.11、表-3.12に、考慮した引張軟化特性を図-3.25に非線形ジョイント要素の概念図を図-3.26に示す。入力地震動（最大加速度 450 gal ）を図-3.27に示す。なお、同地震動は平成7年兵庫県南部沖地震の際、震源近傍の重力式コンクリートダム基礎監査廊で観測された波形をダムの耐震性能照査に用いられる下限加速度応答スペクトル⁹⁾の1.5倍の周波数応答となるように振幅調整した波形である。

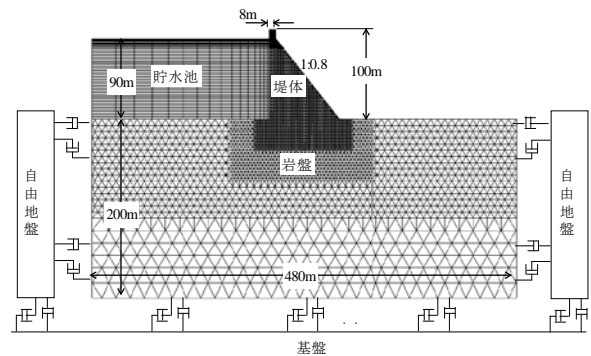


図- 3.23 解析モデル(全体)

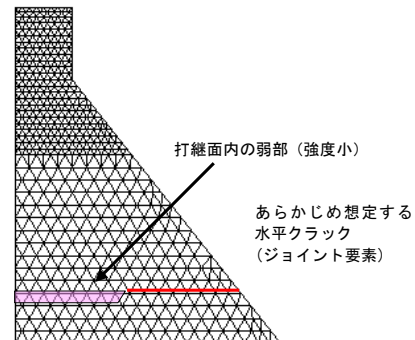


図- 3.24 クラック部のモデル化

表- 3.11 物性値（堤体・岩盤）

項 目	堤体	基礎岩盤
弾性係数 $E(\text{N/mm}^2)$	29,000	40,000
ポアソン比 ν	0.2	0.3
単位体積質量(kg/m^3)	2,300	2,300
減衰型	レイリー型	レイリー型
引張軟化特性	図- 3.25	—
減衰定数 $h(\%)$	10	5

表- 3.12 あらかじめ想定するクラック部
(ジョイント要素) の物性値

項 目	クラック部	備 考
軸剛性 k_n (N/mm ²)	0 (開口時)	—
	290,000 (閉口時)	堤体(健全部)の弾性係数の 10倍相当と設定
せん断剛性 k_s (N/mm ²)	0 (開口時)	—
	110,000 (閉口時)	堤体(健全部)の弾性係数及 びポアソン比より算出
引張強度 σ_t (N/mm ²)	0	—

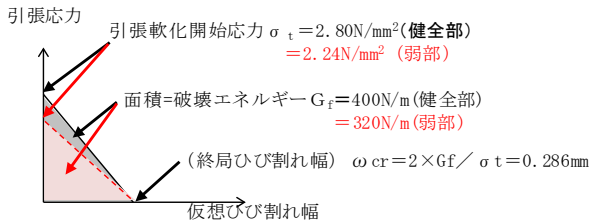


図- 3.25 コンクリートの引張軟化曲線 (単直線型)

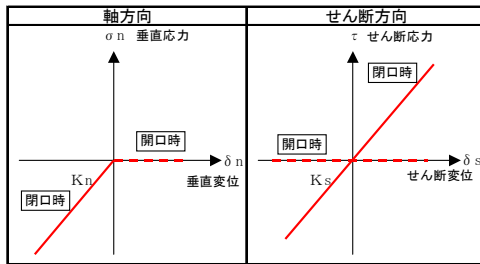


図- 3.26 非線形ジョイントモデル

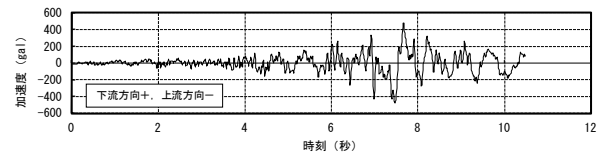


図- 3.27 入力地震動 (水平方向)

解析結果を図- 3.28 に示す。同図の (a) は、地震前には劣化・損傷がないモデルダム、(b) は、同様の条件での解析をあらかじめ堤体の一部に水平クラックがある状態を想定した場合の結果である。両ケースとも、クラックが堤体を貫通する状態には至っていない。しかし、明らかにケース (a) よりもケース (b) の方がより堤体の安定性の低下度合いは大きい。高経年化した既設ダムや地震により被災したダムなど、各種点検・診断により堤体内に連続するクラックが想定されるなど顕著な健全性の低下が示唆される場合には、より詳細な劣化・損傷範囲の調査を行ったうえで、その結果を適切に反映した健全度診断が行われる必要がある。

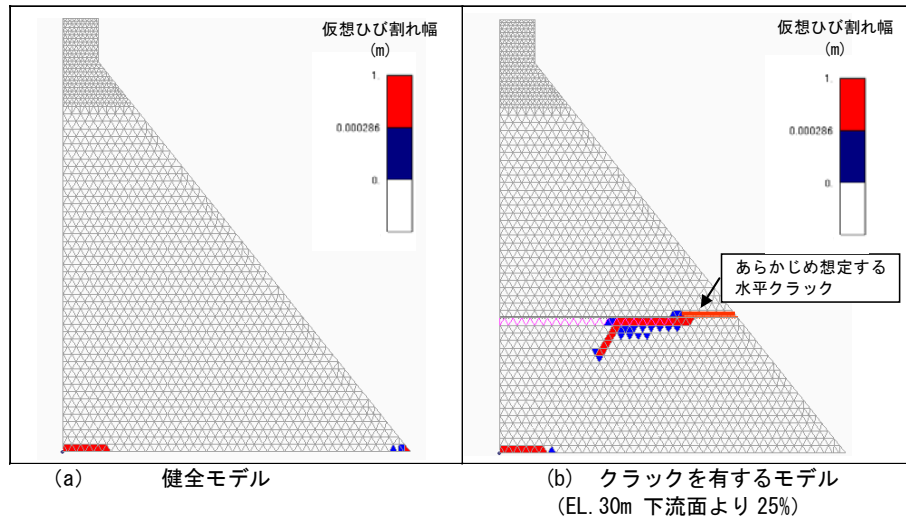


図- 3.28 大規模地震による堤体の損傷範囲推定の例 (最大加速度 450gal)

(2) クラックが堤体を貫通しない限界の地震動強さの推定

図- 3.29 は、図- 3.28 に示した解析と同様の手法の解析をあらかじめ想定する水平クラックの位置・範囲と入

力地震動の加速度レベルの種々変えた組み合わせについて行い、その結果から、地震動によって進展したクラックが堤体を貫通するに至る地震動レベル (最大加速度) を求めたものである。クラックを想定した位置・範囲は

図-3.29の着色部分である。入力地震動は図-3.27の波形の振幅を図-3.29の凡例に示す各加速度レベルまで一律に引き延ばして作成した。限られたケースの解析結果であるが、予め生じているクラック範囲が広い（深い）ほど、また、堤体上部に位置するものであるほど、より小さな加速度の地震動でクラックが貫通に至る結果となった。

このような分析をあらかじめ行っておけば、健全度診断の結果推定されるクラックの位置や範囲に応じて、それがダムの安全性（堤体の安定性）に及ぼす影響を評価することができ、点検や対策の検討をすべき箇所の優先

度を判断するための情報として活用できるものと考えられる。

表-3.13 クラック想定ケース

クラック標高	クラック位置	クラック延長
EL.0m EL.15m EL.30m EL.45m EL.60m EL.90m	上流面 下流面	当該標高の 堤体幅の 25% 50% 75%

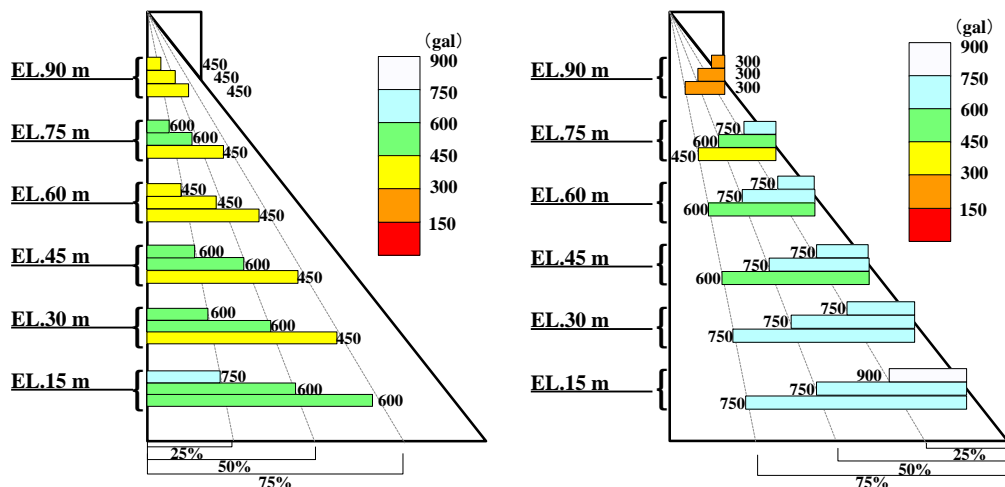


図-3.29 予め想定した水平クラックの位置・深さと貫通クラックが生じる限界の地震動強さ（最大加速度）の関係

4. 長期供用ダムにおける安全管理のための計測（維持すべき項目、箇所の判断方法）に関する検討

4.1 概要

近年、長期供用ダムの増加や、ダムの設計施工や構造に関する知識の経験豊富なダム管理職員が少なくなり、技術的支援が必要となる機会が増えている。また、ダムの挙動が定常状態に達した後の長期にわたる管理期間（表-4.1に示す安全管理における期間の区分¹²⁾の第3期）に入り築堤後長期間経過したダムにおいては、計器の故障等により本来計測すべき箇所の計測を実施していない事例もみられる。これは、挙動が安定した長期供用ダムにおいても計測を継続すべき項目や計測箇所の存続・中止の考え方について明確な判断基準が整理されていないことが原因の一つであると考えられる。

そのため、本研究では、挙動が安定した第3期の長期供用ダムにおいて、必要な管理水準を継続するための合理的な計測項目・箇所の存続・中止の判断方法について

検討を進めている。

平成24年度は、表-4.1と表-4.2に示すダムの状態（挙動の安定化）に応じた現在の安全管理の考え方を踏まえ、河川管理施設等構造令で規定されている表-4.3に示すコンクリートダムでの計測項目を対象として、平成23年度に提案を行った「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方（案）」（表-4.4）について実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、適用性の検証を行った。なお、表-4.4については、平成23年度の提案時点から一部表現を見直している。

表-4.1 「ダム構造物管理基準」¹²⁾における管理の期間の区分

第1期	試験湛水開始から満水以後所用時間を経過するまで
第2期	第1期経過以後ダムの挙動が定常状態に達するまで
第3期	第2期経過移行

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

表- 4.2 「ダム構造物管理基準」⁴⁻¹⁾ における計測頻度の規定（重力式コンクリートダム 抜粋）

		堤高 50m 未満	50m 以上 100m 未満	100m 以上	備 考
漏水量	第 1 期	1 回 / 日			
	第 2 期	1 回 / 週			
	第 3 期	1 回 / 月			
変形	第 1 期	－	1 回/週	1 回/日	30m 以上のアーチダムを除くコンクリートダムで、計測による変形にほとんど変化が認められないものは、第 3 期の計測を省略してもよい。また高さ 70m 未満のフィルダムについては、第 3 期は半年ごとに 1 回としてもよい。フィルダムの上流側のり面については、貯水位が低下したときに行えばよい。
	第 2 期	－	1 回/月	1 回/週	
	第 3 期	－	1 回/3 月	1 回/3 月	
揚圧力	第 1 期	1 回 / 週			漏水量が比較的少なく、かつ揚圧力が小さいものについては、第 3 期の計測を省略してもよい。
	第 2 期	1 回 / 月			
	第 3 期	1 回 / 3 月			

表- 4.3 河川管理施設等構造令⁸⁾における計測装置の規定

（計測装置）
第 13 条 ダムには、次の表の中欄に掲げる区分に応じ、同表の下欄に掲げる事項を計測するための装置を設けるものとする。

項	区 分		計 測 事 項
	ダ ム の 種 類	基礎地盤から堤頂までの高さ （単位 m）	
一	重力式コンクリートダム	50 未満	漏水量 揚圧力
		50 以上	漏水量 変形 揚圧力
二	アーチ式コンクリートダム	30 未満	漏水量 変形
		30 以上	漏水量 変形 揚圧力
三	フィルダム	ダムの堤体がおおむね均一の材料によるもの	漏水量 変形 浸潤線
		その他のもの	漏水量 変形

2 基礎地盤から堤頂までの高さが 100m 以上のダムまたは特殊な設計によるダムには、前項に規程するもののほか、当該ダムの管理上特に必要と認められる事項を計測するための装置を設けるものとする。

表- 4.4 長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方（案）¹³⁾を一部修正
（重力式コンクリートダム）

（a）漏水量（三角堰による計測）

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
①漏水量（三角堰等による計測）	ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	すべてのダム	①-1 全漏水量を一括計測（基本）
		堤頂長が長いダム	①-2 左右岸の漏水量計測を分離して計測 河床部の幅が広いダムでは左右岸に加え、河床部の漏水量も分離して計測
		堤高の高いダム	①-3 高標高部と低標高部で漏水量を分離して計測
		地山からの漏水の影響が大きいダム	①-4 地山漏水量と堤体漏水量を分離して計測

①-1

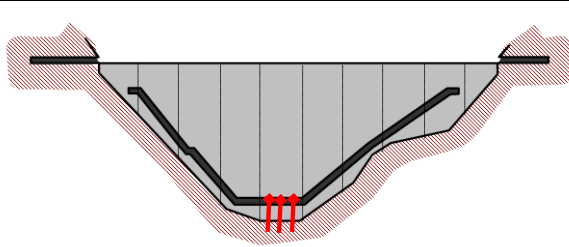
①-2

①-3

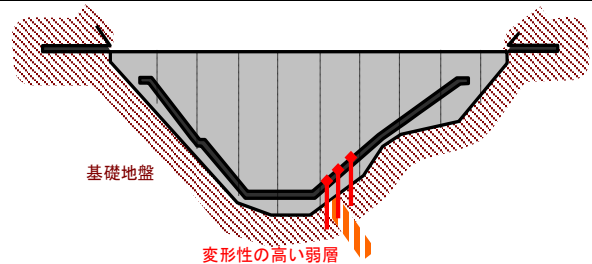
①-4

(b) 基礎排水孔による排水量・揚圧力

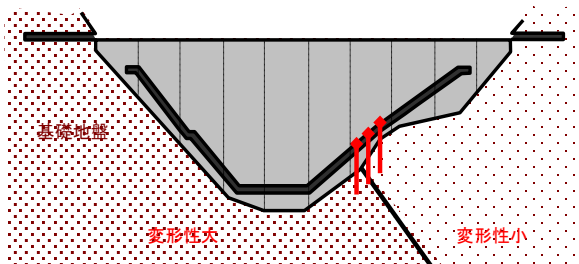
計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
②基礎排水孔による排水量・揚圧力	ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	全てのダム	②-1 最大断面ブロック付近の基礎排水孔
	基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所	規模の大きな弱層(断層など)を基礎岩盤に有するダム	②-2 規模の大きな弱層(断層など)付近の基礎排水孔を含むブロック 注) 試験湛水中に漏水(排水)に土粒子の混入がみられたため、基礎排水孔を閉塞したまま揚圧力の計測のみを実施している基礎排水孔はこの限りではない。
		基礎岩盤の変形性の差が極端に大きい箇所を基礎岩盤に有するダム	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所の基礎排水孔を含むブロック
	既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	試験湛水時や地震時などに注意を要する計測結果が得られたブロックがあるダム	②-4 以下の基礎排水孔を含むブロック ・排水量が多い ・揚圧力が高い ・排水量が多く揚圧力が高い ・濁水、土粒子の流出
	大規模地震後の迅速な安全性評価のために計測が必要と考えられる箇所	全てのダム	②-5 各ブロック1箇所の基礎排水孔 ※常時満水位以上に基礎を有するブロックを除く



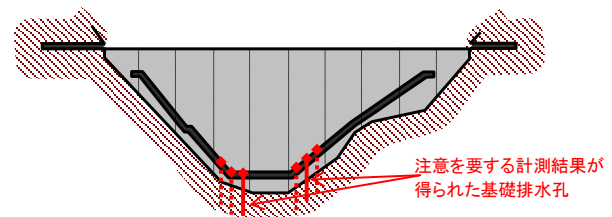
②-1



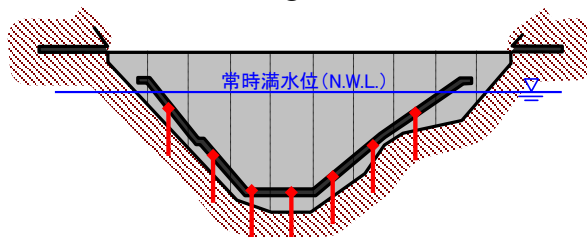
②-2



②-3

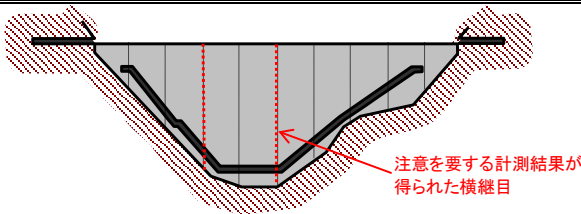


②-4



②-5

(c) 継目排水孔からの漏水量

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
③継目排水孔からの漏水量	既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	試験湛水や地震時などに注意を要する計測結果が得られた横継目のあるダム	③-1 試験湛水時や地震時に漏水量が多くなった継目排水孔。
 <p style="text-align: center;">③-1</p>			

(d) 変形

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
④変形	ダムの構造上計測に適した箇所	全てのダム	④-1 最大断面付近のブロック(基本)でのブラムラインによる変形(たわみ量)計測
		必要に応じて(ブラムライン未設置または設置が困難なダムで、変位計測が必要がな場合等)	④-2 各ブロックでの GPS 等による変位計測

リバースブラムライン
(堤体と基礎部分の相対変位)

ノーマルブラムライン
(堤体上・下部の相対変位)

④-1

計測点 (GPS 変位計)

測線

④-2

4.2 実ダムでのケーススタディー

表- 4.4 に示した「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方(案) (以下「考え方(案)」という。)」について、必要に応じ、追加や修正を行うべき点を明らかにするため、挙動が安定した第3期のダムを対象にケーススタディーを行った。

- 1) 供用開始年代が比較的新しく、現状でも供用開始当初とほぼ同程度の多数の計測が行われているケース
- 2) 供用開始年代が古く、当初から計測項目・箇所が限定されているケース

4.2.1 供用開始時とほぼ同程度の多数の計測が継続し

で行われているケース

対象としたダムは、1999年に完成した堤高50m、堤頂長445m、堤体積455,000m³の重力式コンクリートダム(以下、Xダム)である。

Xダムの堤体計測設備一覧を表- 4.5に、堤体計測設備の配置を図- 4.1にそれぞれ示す。現状でのXダムにおける計測は、漏水量については右岸と左岸の計測2カ所、基礎排水孔による基礎排水量と揚圧力の計測は各ブロック2カ所(計52カ所)、継目排水孔からの漏水量の計測が各継目位置(計27カ所)、変形については、ブラムラインによる堤体の変形計測が1カ所で実施されている。

表- 4.5 堤体計測状況 (X ダム)

項目	計測設備	計測箇所	観測方法
①漏水量(三角堰等による計測)	三角堰	右岸:1ヶ所 左岸:1ヶ所	自動計測
②基礎排水孔による排水量・揚圧力	基礎排水孔、 (排水量、ブルドン管圧力計)	52ヶ所	手動計測
③継目排水孔からの漏水量	継目排水孔 (漏水量、ブルドン管圧力計)	27ヶ所	手動計測
④変形	プラムライン	1ヶ所	自動計測

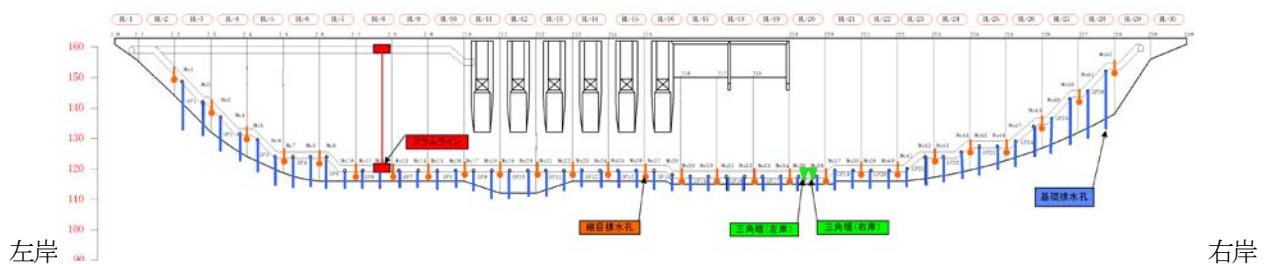


図- 4.1 堤体計測設備の配置 (X ダム)

Xダムについて、表- 4.4に示した「考え方（案）」を適用した場合に計測を継続すべき箇所として抽出される箇所と現状での計測箇所との比較を計測項目①～④についてそれぞれ行った。なお、比較にあたっては、「考え方（案）」で不足している計測を継続すべき箇所の類型

や各類型の適用条件の妥当性について確認するため、「考え方（案）」で抽出した計測を継続すべき箇所の適合性を表- 4.6に示す凡例により整理することとした。

表- 4.6 「考え方（案）」との適合性

「考え方（案）」 との適合性の記号	記号の意味
○	<ul style="list-style-type: none"> ・考え方（案）を適用した場合に抽出される箇所において計測が継続されていて、考え方、計測箇所とも現状のままで良いと考えられるもの ・考え方（案）を適用した場合に抽出されない箇所で、実ダムでの計測が実施されていない箇所で、考え方（案）と矛盾しないもの
●	<ul style="list-style-type: none"> ・考え方（案）を適用した場合に抽出される箇所であるが、現状では計測がなされておらず、考え方（案）を適用しない場合の問題点を明らかにした上で、必要に応じ、実ダムにおいて計測箇所の追加（復旧）等の検討が必要または望ましいと考えられるもの
◎	<ul style="list-style-type: none"> ・考え方（案）を適用した場合に抽出されない箇所であるが、実ダムで計測がなされている箇所で、考え方（案）に計測を継続すべき箇所として追加すべきと考えられるもの
(○)	<ul style="list-style-type: none"> ・考え方（案）を適用した場合に抽出される箇所をカバーして計測が継続されているが、ダムの挙動の安定性が維持されていると判断できることを前提に将来的に計測の合理化の可能性を検討する余地があると考えられるもの

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

①漏水量（三角堰等による計測）

X ダムの漏水量の現状での計測箇所と「考え方（案）」により計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表- 4.7 に示す。

表- 4.7 により、X ダムでの三角堰による漏水量計測への「考え方（案）」の適用性は以下のように整理できる。

①-1：全漏水量の計測

X ダムでは、現状で全漏水量の計測が行われている。全漏水量の計測は、ダムの漏水量計測に関する最も基本的

データである。このため、X ダムに限らず、長期的な変化を把握する上で継続して実施すべきものであることは、「考え方（案）」に示すとおりである。なお、X ダムにおいて三角堰で計測されている全漏水量は経年的に減少傾向で安定しており、ダムの挙動が安定した第3期以降後の全漏水量は計9ℓ/min とごく少量である。また、年間の全漏水量の変動は、図- 4.2 に示すように貯水位や外気温との相関がみられ、通常、重力式コンクリートダムで見られる一般的な傾向を示している。

表- 4.7 「考え方（案）」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較①

(X ダム、三角堰等による漏水量の計測)

分類	「考え方(案)」において計測を継続すべき箇所等の考え方	適用条件	Xダムでの該当有無	Xダムでの現状	考え方(案)の適合性	備考
ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	①-1 全漏水量を一括計測	すべてのダム	該当する	全漏水量の計測を実施	○	・漏水量の基本計測データとして、現状どおり計測を継続すべきものである。
	①-2 左右岸の漏水量計測を分離して計測 河床部の幅が広いダムでは左右岸に加え、河床部の漏水量も分離して計測	堤頂長が長いダム	該当する 堤頂長が長い (445m、計30ブロック)	左右岸を分離して計測を実施	○	・堤頂長が長く、今後とも現状通り左右岸を分離して計測を継続することが望ましいと考えられる。
	①-3 高標高部と低標高部で漏水量を分離して計測	堤高の高いダム	該当しない (堤高50mの堤頂長に対する比は小さい)	標高別に区分した計測は未実施	○	・堤頂長に対する堤高の比は小さく、標高別に漏水量を分離して計測する必要性が低い場合に該当するものと考えられる。
	①-4 地山漏水量と堤体漏水量を分離して計測	地山からの漏水の影響が大きいダム	該当しない (監査廊に接続するグラウトトンネルなどからの地山漏水量の影響を分離して把握すべき箇所はない)	地山からの漏水の分離計測は未実施	○	・地山からの漏水量を分離して把握すべき箇所がないため、特に必要がない場合に該当するものと考えられる。
	①-5(今回の追加項目) 試験湛水時や既往地震時の計測・巡視記録等から注意すべき箇所(範囲)	既往管理記録等から追加の計測が必要と考えられる箇所があるダム	—	—	◎	・Xダムでは各基礎排水孔、継目排水孔での計測が行われており追加計測は必要ないものと考えられる。

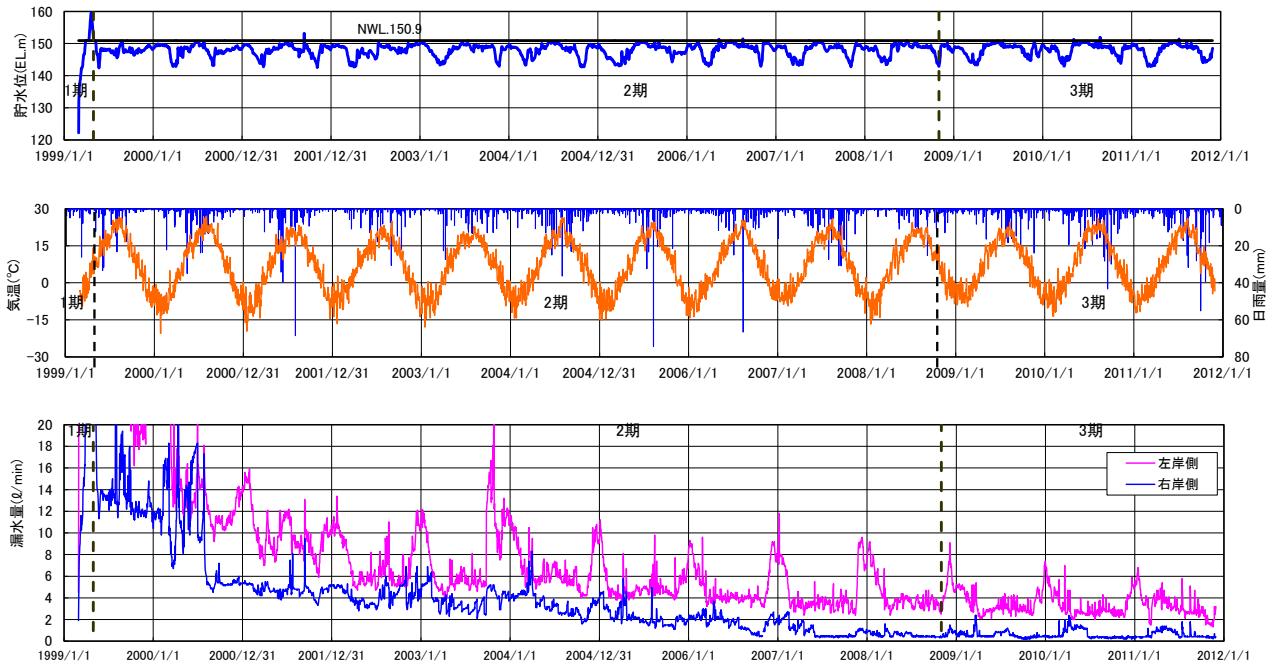


図- 4.2 X ダムの貯水位・気温・雨量・漏水量計測結果 (X ダム)

①-2：左右岸別漏水量の計測

X ダムでは、現状で左右岸の漏水量を分離して計測している。仮に漏水量の計測箇所を1箇所(全漏水量のみ)とした場合には、堤頂長が長いと、現状よりも異常個所の特定に時間を要することになる。また、X ダムの設計資料等によれば、X ダムでは右岸側に透水性の高い砂岩層が分布すると共に、コンソリデーショングラウチングの施工実績から、河床部(左岸側)にも高透水部が確認されている。仮に全漏水量の変化が見られた場合、このような地質的条件との関係からその原因箇所の絞り込みを可能とする上でも、少なくとも現状のまま左右岸で別漏水量の計測を継続することがよいと考えられる。これは、「考え方(案)」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方と合致するものである。なお、仮に将来、大規模地震時などにおいて、左右岸の漏水量に何らかの変化傾向が見られた場合は、必要に応じさらにブロックを区分して計測することも考えられる。

①-3：標高別漏水量の計測

X ダムの堤高は50m程度とそれほど高くはなく、また堤頂長に対する比は小さい。このため、ダム軸沿いの堤体・基礎の縦断形状の観点からは、標高別に漏水量を計測する必要性は余り高くはないと考えられる。これは、「考え方(案)」に示した適用条件の考え方と矛盾しない。

①-4：地山漏水の分離計測

X ダムでは、基礎監査廊に接続するグラウトトンネル等は設置されておらず、三角堰で計測される漏水量に地山からの漏水が流入して大きく影響を与えることはないと考えられる。このため、X ダムでは、地山漏水を分離して計測する必要性は低いと考えられる。これは、「考え方(案)」に示した適用条件の考え方と矛盾しない。

なお、表-4.2に示す「考え方(案)」の①三角堰等による漏水量の計測では、主にダム基礎岩盤の地質条件や堤体形状等構造条件に基づき計測して継続すべき箇所を抽出する構成となっており、実際に試験湛水時や供用開始後の漏水量の計測データも踏まえて検討を行う構成となっていない。X ダムでは、個々の基礎排水孔・継目排水孔で個別計測が行われているため、仮にこの観点から注意すべき箇所(範囲)があったとしても三角堰等を追加設置する必要性は低いと考えられるが、個別計測が行われていないダムでは、既往の漏水量計測データも踏まえ、必要に応じ三角堰等を増設して集水範囲の分割を行い、異常発生箇所の特定を迅速に行うことができるようにする検討も必要と考えられる。このため、「考え方(案)」の漏水量計測を継続すべき箇所の類型として、既往の計測結果により必要と考えられる箇所を加える必要があると考えられる。このため、表-4.8にこの点を「②-5各ブロック1箇所の基礎排水孔」として追記している。

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

②基礎排水孔による排水量・揚圧力

X ダムでの基礎排水孔による排水量・揚圧力の現状で

の計測箇所と計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表- 4.8 に示す。

表- 4.8 「考え方 (案)」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較②
(X ダム、基礎排水孔での排水量・揚圧力の計測)

分類	「考え方(案)」において計測を継続すべき箇所等の考え方	適用条件	X ダムでの該当有無	X ダムでの現状	考え方 (案)の適合性	備考
ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	②-1 最大断面ブロック付近の基礎排水孔	全てのダム	該当する	最大断面ブロックで基礎排水量と揚圧力の計測を実施	○	・基礎排水量及び揚圧力の基本計測データとして、現状どおり計測を継続すべきものである。
基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所	②-2 規模の大きな弱層(断層など)付近の基礎排水孔を含むブロック	規模の大きな弱層(断層など)を基礎岩盤に有するダム	該当する (基礎岩盤に透水性の高い砂岩層の箇所がある)	全基礎排水孔 52 ヶ所で計測を実施しており、地質的に注意すべき箇所もカバーしている。	(○)	・基礎地盤に地質的に注意すべき箇所(透水性の高い砂岩層など)があるため、②-1に加え、少なくとも当該箇所周辺のブロックでは個別孔での計測を継続すべきと考えられる。
	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所の基礎排水孔を含むブロック	基礎岩盤の変形性の差が極端に大きい箇所を基礎岩盤に有するダム	該当しない (基礎岩盤の変形性が極端に大きい箇所は想定されていない)	全基礎排水孔 52 ヶ所で計測を実施しているが、基礎岩盤の変形性の差に着目した箇所はない	○	・基礎岩盤の変形性が極端に大きい箇所が想定されないことから、当該条件に着目した追加計測の必要性はないと考えられる。
既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	②-4 以下の基礎排水孔を含むブロック ・排水量が多い ・揚圧力が高い ・排水量が多く揚圧力が高い ・濁水、土粒子の流出	試験湛水時や地震時などに注意を要する計測結果が得られたブロックがあるダム	該当する (基礎排水量・揚圧力とも全体的には経年的に減少し、安定しているが、一部相対的に排水量の多い箇所がある)	全基礎排水孔 52 ヶ所で計測を実施	(○)	・基礎排水量・揚圧力とも全体的に減少し、安定しているが、少なくとも相対的に値の大きい箇所は計測を継続するのがよいと考えられる。
大規模地震後の迅速な安全性評価のために計測が必要と考えられる箇所	②-5 各ブロック 1 箇所の基礎排水孔	全てのダム	該当する	全基礎排水孔 52 ヶ所(各ブロック 2 箇所)で計測を実施	○	・これまでの地震時に基礎排水量が増加した孔があり、今後とも当該箇所を含め、各ブロック1箇所程度は、計測を継続して実施するのがよいと考えられる。

表- 4.8 により、X ダムでの基礎排水孔における排水量・揚圧力計測に関する「考え方 (案)」の適用性は以下のように整理できる。

②-1：最大断面ブロックでの計測

現状で、最大断面ブロックで基礎排水量と揚圧力の計測が実施されている。基礎排水量や揚圧力は、作用する浸透圧に連動するものと考えられ、水圧が最大となる最大断面位置での計測データは、ダムの安定性を評価する上で最も基本的なデータの 1 つとなるものと考えられる。このため、当該箇所は、X ダムに限らず、基礎排水量や揚圧力の計測を継続して実施すべき箇所であることは、

「考え方 (案)」に示すとおりである。

②-2：基礎岩盤の地質上注意すべき箇所での計測

X ダムの基礎岩盤では、その一部にやや透水性が高い砂岩層など地質的に注意すべき箇所が分布しており、仮に異常が生じた場合にその箇所を早期に特定するためにも、当該地質の範囲では、現状どおり 1 ブロック 2 孔程度の計測を継続することを基本とするのがよいと考えられる。これは、「考え方 (案)」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方と合致するものである。

②-3：基礎岩盤の変形性の相違の観点から注意すべき箇所での計測

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

X ダムでは、ダム軸上において岩盤の変形が大きく異なる箇所は想定されておらず、長期的に堤体の不等沈下などの問題が生じることは考えにくい。このため、基礎岩盤の変形性の相違の観点から基礎排水孔を用いた特別な監視を行う必要性はないと考えられる。これは、「考え方(案)」に示した適用条件の考え方と矛盾しない。

②-4：既往計測データから注意すべきと考えられる箇所での計測

X ダムの基礎排水量は経年的に減少傾向を示しており、図-4.3に示すように全孔において最大約10/min以下と安定している。また、年間変動としては、基礎排水量は概ね貯水位と比例して増減する一般的な傾向を示す。このように、特段注意すべき兆候は見られないが、基礎排

水量が相対的に多い孔については継続して計測を実施するのがよいと考えられる。

また、揚圧力についても経年的に減少傾向を示し、全孔において0.6kgf/cm²以下に安定しており、現状(近年)の河床部付近における揚圧力係数は図-4.4に示すように0.2以下である。ただし、揚圧力が相対的に大きくかつ継目排水孔からの漏水が認められる孔があり、また継目排水孔からの漏水量が多い孔では、継目排水孔からの漏水量と同様に12~1月に揚圧力が高まる傾向を示すことから、これらの孔については継続して計測を実施するのがよいと考えられる。

以上のことは、「考え方(案)」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方と合致している。

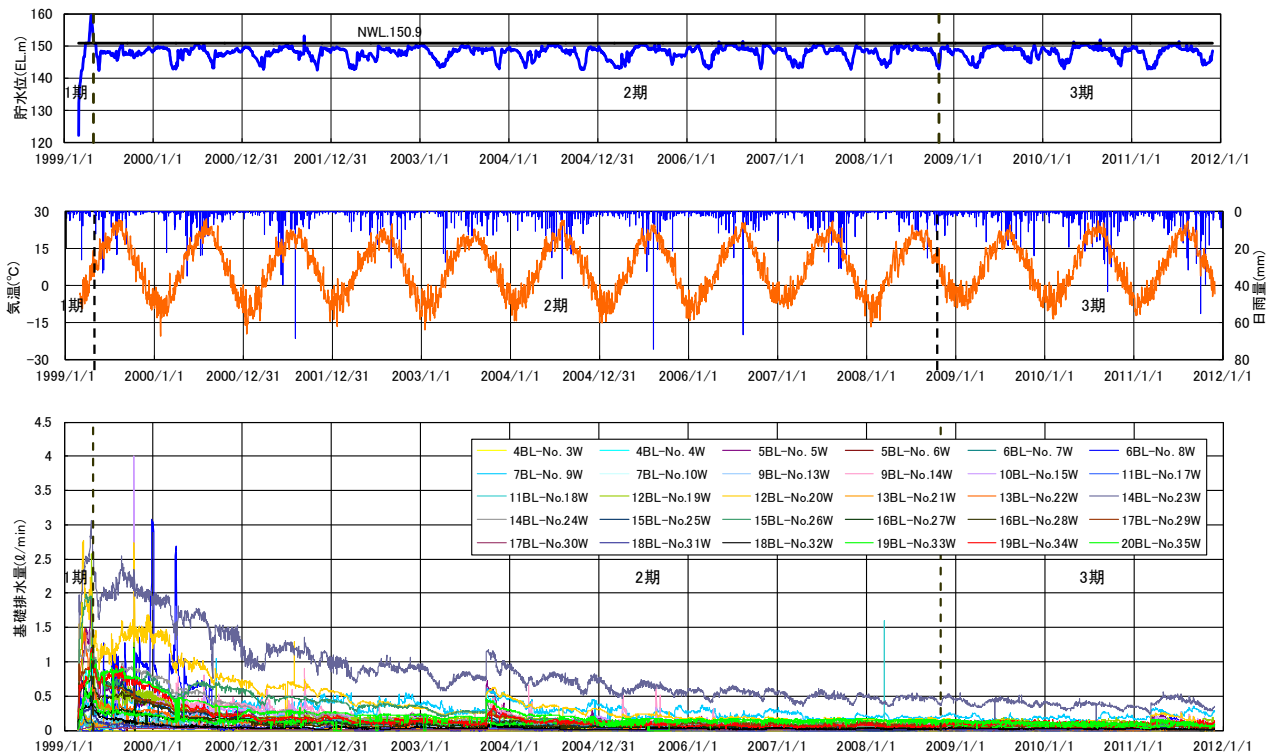


図-4.3 貯水位・気温・雨量・漏水量計測結果 (X ダム)

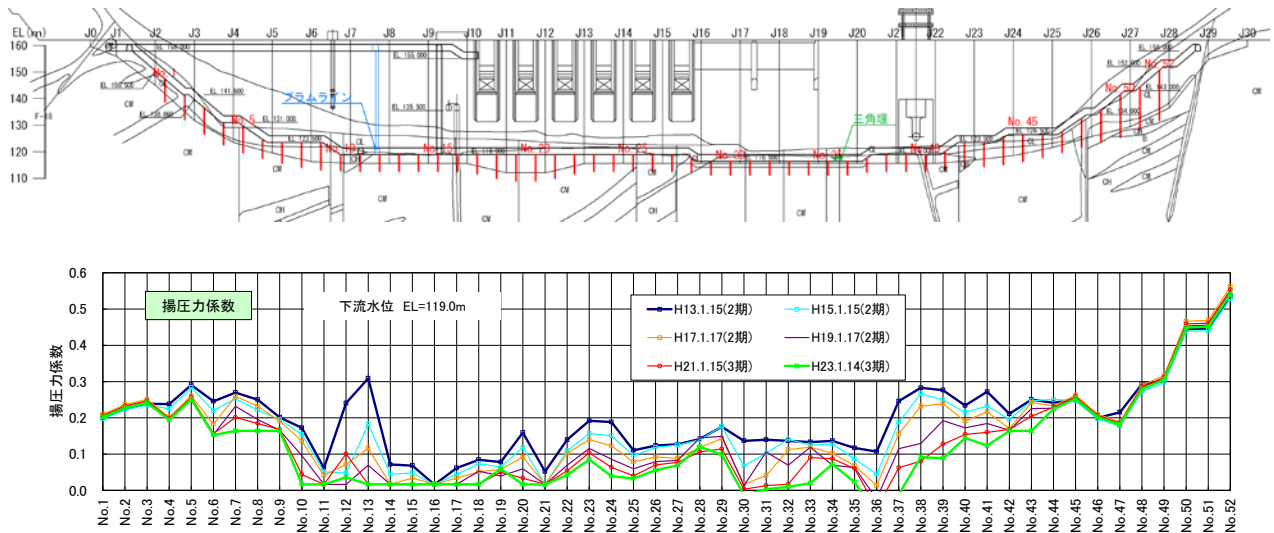


図- 4.4 実測による揚圧力係数 (X ダム)

②-5：大規模地震後の迅速な安全性評価のための計測

X ダムの基礎排水量は、2003 年の地震（ダム基礎部での最大加速度 12.9gal）の際に 2 箇所の孔で、それぞれ約 10/min（約 2.5 倍）、約 0.50/min（約 1.5 倍）増加した。その量及び増加量とも少量であるが、将来的に大規模地震が発生した際にも迅速に安全性を確認するため、当該箇所を含め各ブロック 1 孔程度は長期的に計測を継続するのがよいと考えられる。これは、「考え方（案）」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方と合致するものである。

なお、表- 4.4 に示す「考え方（案）」によれば、X ダムでは現状では必要な箇所での計測が実施されていることになるが、堤頂長が長く、基本的にすべての基礎排水孔で基礎排水量や揚圧力の計測が行われていることから、実際の計測データの傾向を勘案し、将来的な計器の老朽化や管理人員の減少も想定の上、「考え方（案）」に基づいて継続して計測を維持すべき箇所について、「考え方（案）」に基づく検討しておく必要があると考えられる。このため、表-4.8 中の「②-2 規模の大きな弱層（断層など）付近の基礎排水孔を含むブロック」、「②-4 以下の基礎排水孔を含むブロック」に関する「考え方（案）の適用性」の欄には「(○)」を付している。

③継目排水孔からの漏水量

X ダムでの継目排水孔からの漏水量の現状での計測箇所と計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表- 4.9 に示す。

表-4.9 により、X ダムでの継目排水孔・揚圧力計測に関する「考え方（案）」の適用性は以下のように整理でき

る。

③-1：継目排水孔からの漏水量

X ダムでは、各横継目に対応する位置で継目排水孔からの漏水量が計測されている。各孔からの漏水量は全般的に減少傾向を示し、最も多い孔でも最大約 30/min 以下であり、安定している。また、継目排水孔からの漏水量の年間変動としては、図- 4.5 に示すように貯水位や外気温との相関がみられる。ただし、2003 に発生した地震（基礎部での最大加速度 12.9gal）時には複数（河床部付近 8 箇所）の横継目からの漏水量が増加している。当該箇所での漏水量はその後減少・安定しているものの、再度の地震の際に再び変化が見られる可能性もあることから、これらの箇所については計測を継続するのがよいと考えられる。これは、「考え方（案）」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方と合致するものである。

なお、②の基礎排水孔での漏水量・揚圧力計測と同様、表-4.4 に示す「考え方（案）」によれば、X ダムの継目排水孔からの漏水量については、現状では基本的に全ての横継目について計測が行われており、必要な箇所での計測が実施されていることになるが、既往の地震時等におけるデータ等を勘案し、将来的に継続して計測を維持すべき箇所について、「考え方（案）」に基づく検討しておく必要があると考えられる。このため、表- 4.9 の「考え方（案）の適用性」の欄には「(○)」を付している。

表- 4.9 「考え方(案)」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較③

(X ダム、継目排水孔からの漏水量計測)

分類	「考え方(案)」において 計測を継続すべき箇所等の 考え方	適用条件	Xダムでの 該当有無	Xダムでの現状	考え方 (案)の 適合性	備考
既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	③-1 試験湛水時や地震時に排水量が多くなった継目排水孔	試験湛水や地震時などに注意を要する計測結果が得られた横継目のあるダム	該当する	全継目排水孔 27ヶ所で計測を実施。	(○)	・継目排水孔は全体的に減少傾向を示しているが、一部の孔で漏水量が増大する傾向があるため、該当孔では計測を継続するのがよいと考えられる。

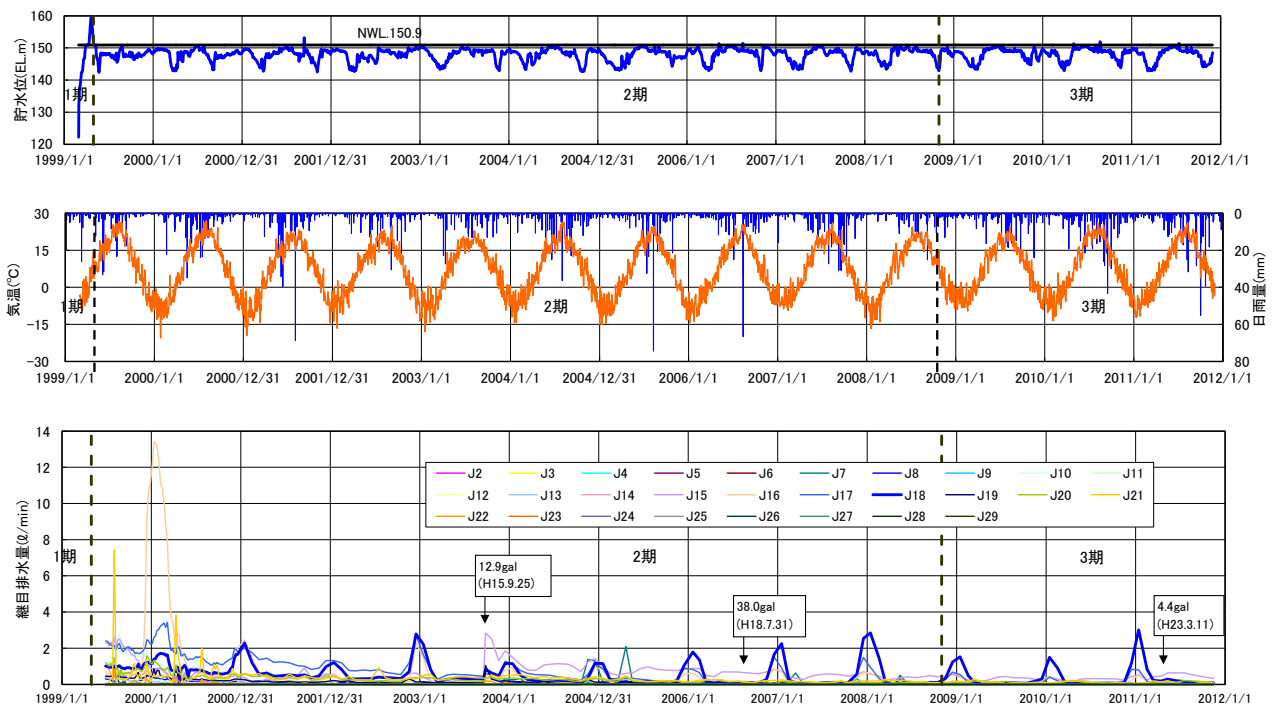


図- 4.5 継目排水孔からの漏水量計測結果 (X ダム)

④変形

X ダムの変形の現状での計測箇所と計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表- 4.10 に示す。表- 4.10 により、X ダムでの変形計測に関する「考え方(案)」の適用性は以下のように整理できる。

④-1：プラムラインによる堤体変位の計測

堤体変位は、ダム天端と基礎部の相対変位量が大きく検知が容易な最大断面付近にて計測するのが理想的である。しかし、X ダムでは最大断面は越流部となっており、プラムラインを設けることが困難なため、非越流ブロックの最大断面にプラムラインを設置し、堤体変位の計測が行われている。現状ではプラムラインで計測された変位量のデータは、主に貯水位や外気温と相関を有する弾

性的な年間変動を示しており、経年的な変位振幅の増大も認められない。このような計測データの安定性を踏まえ、またダムの変状は最終的には堤体の変位に現れると考えられることを考慮し、X ダムのように堤体にプラムラインが設置されているダムでは、プラムラインによる堤体変位の計測を基本計測項目の1つとして長期的に継続していくべきものと考えられる。これは「考え方(案)」に示しているとおりである。

④-2：GPS 等によるブロック別変位計測

X ダムでは、工事誌等設計・施工に関する記録及び供用開始後の安全管理における計測データから、長期的に堤体の変位を監視すべき要因となる未改良の地質的弱部や変状の発生履歴は見られない。よって、堤体変位の計

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

測は、現状で実施されている基本的なプラムライン計測の継続によることでよいものと考えられる。これは「考え方（案）」で示した適用条件と合致するものである。

なお、図- 4.6 に示す X ダムにおけるプラムラインでの計測データを詳細に見ると、経年的に上流及び右岸側にわずかながらシフトする傾向が見られる。これが計器の老朽化によるものかダムの挙動を捉えたものかは不明

であるが、長期的なダムの挙動や異常の有無を判断する上でこのような疑問点が生じた場合、その原因を突き止めるため、必要に応じ他の計測手法による計測を併用することが考えられる。

このため、表- 4.10 の「考え方（案）の適用性」の欄には「○」を付したが、備考に上記の点を付記した。

表- 4.10 「考え方（案）」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較④（X ダム、変形）

分類	「考え方(案)」において計測を継続すべき箇所等の考え方	適用条件	Xダムでの該当有無	Xダムでの現状	考え方(案)の適合性	備考
ダムの構造上計測に適した箇所	④-1 最大断面付近のブロック(基本)でのプラムラインによる変形(たわみ量)計測	最大断面付近のブロック(基本)でのプラムラインによる変形(たわみ量)計測	該当する	洪水吐左岸側の 1 か所。	○	・基本計測項目として、引続き計測を継続すべきものである。
	④-2 各ブロックでの GPS 等による変位計測	各ブロックでの GPS 等による変位計測	該当しない (プラムラインにより基本的な変形量の計測が適切になされている)	—	○	・現有のプラムラインでただちに追加計測を要する特段の状況は認められない。ただし、経年的な上流及び右岸側へのシフトについては原因調査が望ましい。

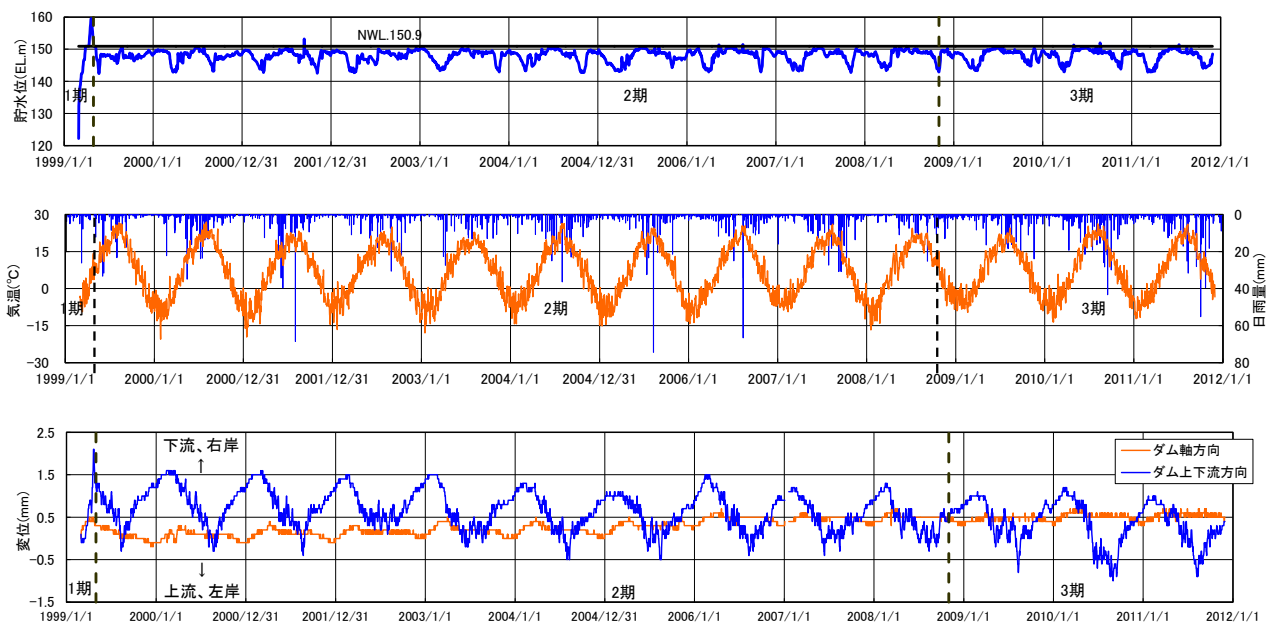


図- 4.6 変位計測結果（X ダム）

4.2.2 供用開始当初から計測項目・箇所が限定されているケース

対象としたダムは、1956年に完成した堤高112m、堤頂長267m、堤体積468,000m³の重力式コンクリートダム（以下、Yダム）である。

Yダムの堤体計測設備一覧を表- 4.11に、堤体計測設備の配置を図- 4.7にそれぞれ示す。現状でのYダムにおける計測は、漏水量は右岸と左岸の計測2カ所、基礎排水孔による基礎排水量と揚圧力計測は最大断面付近の基礎2カ所、継目排水孔からの漏水量の計測は実施され

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

ておらず、変形はブラムラインによる堤体の変形計測が1か所で実施されている。Yダムは、基礎排水孔を用いた排水量及び揚圧力の計測を行うことができる箇所が1ヶ所と、近年建設された重力式コンクリートダムに比べ、基礎排水孔を用いた排水量の計測や揚圧力の計測が非常

に少ないのが特徴である。また、Yダムは表-4.1に示す管理の期間の区分が作成される前に建設されたダムであり、明確に管理の期間の区分は分かれていないが、現在は第3期の運用を行っている。

表-4.11 堤体計測状況 (Yダム)

項目	計測設備	計測箇所	観測方法
①漏水量(三角堰による計測)	三角堰	右岸:1ヶ所 左岸:1ヶ所	自動計測
②基礎排水孔による排水量・揚圧力	基礎排水孔、 (排水量、ブルドン管圧力計)	最大断面付近基礎:1ヶ所	手動計測
③継目排水孔からの漏水量	継目排水孔 (排水量、ブルドン管圧力計)	計測箇所なし	計測箇所なし
④変形	ブラムライン	エレベーターシャフト付近:1か所	自動計測

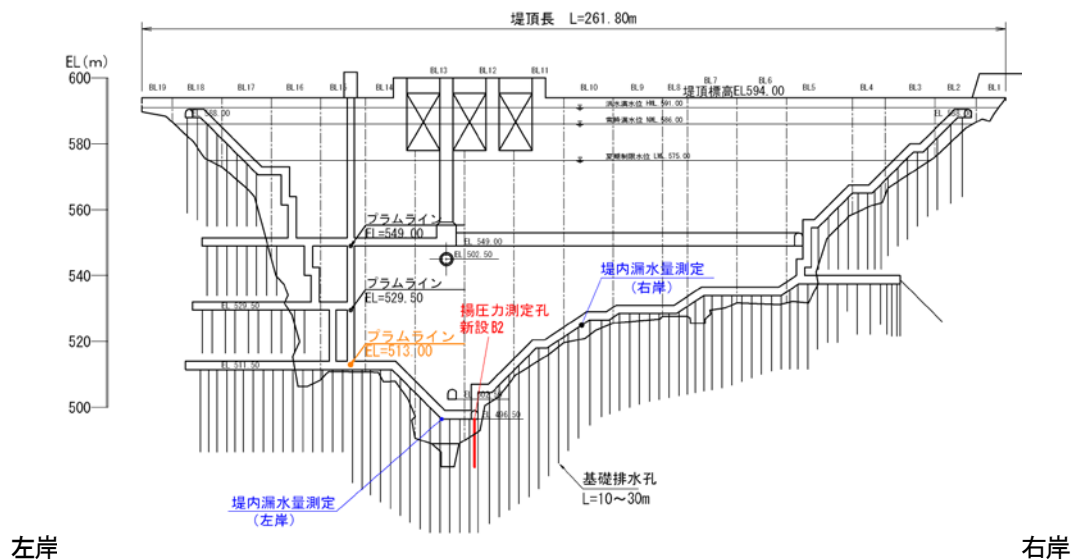


図-4.7 堤体計測設備縦断配置 (Yダム、上流面)

Yダムについて、表-4.4に示した「考え方(案)」を適用した場合に計測を継続すべき箇所として抽出される箇所と現状での計測箇所との比較を計測項目①～④についてそれぞれ行った。なお、「考え方(案)」で抽出した計測を継続すべき箇所の適合性は、Xダムの場合と同様、表-4.6に示す凡例により整理した。

①漏水量(三角堰等による計測)

Yダムの漏水量の現状での計測箇所と「考え方(案)」により計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表-4.12に示す。

表-4.12により、Yダムでの三角堰による漏水量計測への「考え方(案)」の適用性は以下のように整理できる。

①-1: 全漏水量の計測

Yダムでは、現状で全漏水量の計測が行われている。全漏水量の計測は、ダムの漏水量計測に関する最も基本的データである。このため、Yダムに限らず、長期的な変化を把握する上で継続して実施すべきものであることは、「考え方(案)」に示すとおりである。ただし、Yダムでは供用開始後現在までの連続したデータが得られていない。このため、得られているデータの範囲での分析となるが、Yダムにおいて三角堰で計測されている全漏水量は経年的に減少傾向で安定しており、ダムの挙動が安定した後の全漏水量は図-4.8に示すように計200/min程度と少量である。

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

表- 4.12 「考え方(案)」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較①

(Y ダム、三角堰等による漏水量の計測)

分類	「考え方(案)」において 計測を継続すべき箇所等の 考え方	適用条件	Yダムでの 該当有無	Yダムでの現状	考え方 (案)の 適合性	備考
ダムの構造 上計測が必要と考えら れる箇所	①-1 全漏水量を一括計測	すべてのダム	該当する	全漏水量の計測を 実施。	○	・漏水量の基本計測 データとして、現状ど おり計測を継続すべ きものである。
	①-2 左右岸の漏水量計測を分離 して計測 河床部の幅が広いダムでは 左右岸に加え、河床部の漏 水量も分離して計測	堤頂長が長いダム	該当しない (堤頂長 261m、計 19 ブロック)	左右岸を分離して計 測を実施。	○	・堤頂長はさほど長く ないが、堤高が高く、 基礎岩盤の範囲が比 較的広いため、今後 とも現状通り左右岸を 分離して計測を継続 することがよいと考え られる。
	①-3 高標高部と低標高部で漏水 量を分離して計測	堤高の高いダム	該当する (堤高が高い 112m)	右岸側では、中標高 部で漏水量計測を実 施することで、高標 高部と低標高部の漏 水量を分離計測して いる。	○	・堤高が高いこと、特 に右岸側は左岸に比 べ傾斜が緩く基礎岩 盤範囲が広いことか ら、右岸側中標高部 での計測は継続して 行うがよいと考えら れる。
	①-4 地山漏水量と堤体漏水量を 分離して計測	地山からの漏水の 影響が大きいダム	該当する	左右岸とも基礎監査 廊に接続するグラウ トトンネルを通じて 地山漏水が基礎監 査廊に流入するもの と考えられるが、地 山漏水量と堤体漏水 量を分離して計測を していない。	●	・左右岸のグラウト トンネルからの地山漏 水の影響が大きい可 能性があるため、左 岸・右岸とも地山漏水 を分離して計測する のがよいと考えられ る。
	①-5(今回の追加項目) 試験湛水時や既往地震時の 計測・巡視記録等から注意す べき箇所(範囲)	既往管理記録等から 追加の計測が必要と 考えられる箇所があ るダム	—	—	◎	・Yダムでは基礎排水 孔、継目排水孔での 計測は河床部でしか 行われていないた め、必要に応じ追加 計測を行うのがよい と考えられる。

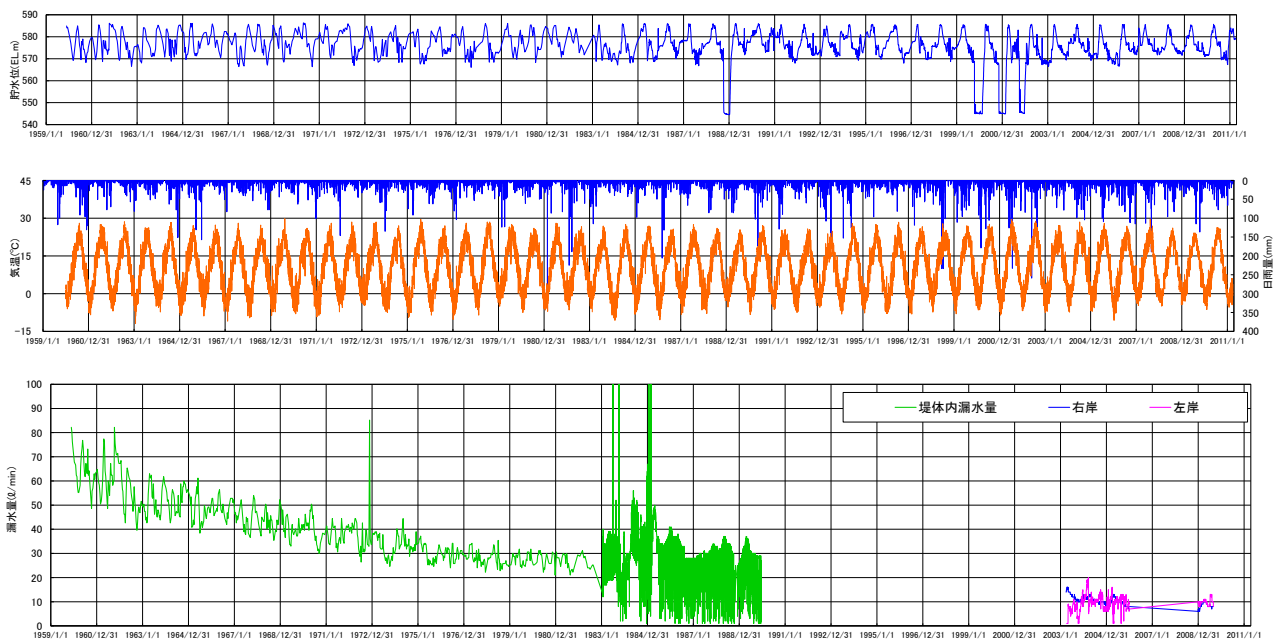


図- 4.8 貯水位・気温・雨量・漏水量計測結果 (Y ダム)

①-2：左右岸別漏水量の計測

Y ダムでは、現状で左右岸の漏水量を分離して計測している。仮に漏水量の計測箇所を1箇所(全漏水量のみ)とした場合には、堤高が高い上、基礎監査廊は延長が長くかつ急勾配であること、また各ブロック孔別の基礎排水量等の計測が行われていないことから、全漏水量が増加した場合には目視により異常個所の特定を行う必要が生じ、時間を要することになる。「考え方(案)」では、左右岸別漏水量の分離計測を継続して行うべき場合として堤頂長が長い場合のみを挙げているが、Y ダムのような条件のダムでは、漏水量をその集水域を区分して計測することの有効性が大きいと考えられる。

①-3：標高別漏水量の計測

Y ダムでは、堤高が112mと高いダムではあるが、基礎岩盤の地形が非対称で左岸側が急峻、右岸側は比較的緩勾配となっており、基礎岩盤の範囲が広い。また、右岸側のみ中標高部で漏水量の計測を行い、高標高部と低標高部の漏水を分離して把握しており、今後とも継続すべきと考えられる。Y ダムの地形条件を考慮すれば、このことは、「考え方(案)」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方と合致するものである。

①-4：地山漏水量の分離計測

Y ダムでは、基礎処理のために左右岸地山内にグラウトトンネルが掘削されており、当該トンネル部からの地山漏水は、堤体漏水と合流する構造になっている。この

ため、三角堰で計測される漏水量には、降雨等の影響を強く受ける可能性のある地山漏水の影響が含まれていることになる。また、建設時の調査では特に右岸アバット部は、空洞性亀裂が分布し、相対的に透水性が高い可能性がある。このため、ダム堤体や基礎岩盤の安定性を評価する上では、堤体漏水と地山漏水を分離して計測したほうが良いと考えられる。このことは、「考え方(案)」に示した適用条件及び計測を継続すべき箇所等の考え方からも求められるものであり、このため、表-4.12の「①-4 地山漏水量と堤体漏水量を分離して計測」の「考え方(案)の適用性」の欄には「●」を付している。Y ダムの場合、地山漏水と堤体漏水を分離して計測するには、例えばグラウトトンネルと基礎監査廊の接続部に三角堰を増設することにより、堤体漏水(河床)、堤体漏水(右岸)、地山漏水(左岸)、地山漏水(右岸)の4系統とすることが考えられる。

なお、表-4.4に示す「考え方(案)」の①三角堰等による漏水量の計測では、主にダム基礎岩盤の地質条件や堤体形状等構造条件に基づき計測して継続すべき箇所を抽出する構成となっており、実際に試験湛水時や供用開始後の漏水量の計測データも踏まえて検討を行う構成となっていない。しかし、Y ダムにおけるダムの挙動が安定した後の漏水量計測データを右岸側、左岸側で比較すると、両方で貯水位との相関が異なっており、右岸側漏

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

水量は貯水位との相関が比較的高いが左岸側漏水量では明確でない。非対称な地形条件が一因とも考えられるが、このように明らかに左右岸で変動傾向が異なる場合は、分離しての計測がよいと考えられる。また、継続的計測箇所もこのように実際の計測データの傾向に基づいて検討するのが合理的な場合がある。この点はXダムにおける考察と共通する点であり、「考え方（案）」に追記すべき点である。このため、表- 4. 12 にこの点を、「①-5（今

回の追加項目）試験湛水時や既往地震時の計測・巡視記録等から注意すべき箇所（範囲）」として追記している。

②基礎排水孔による排水量・揚圧力

Yダムにおける基礎排水孔による排水量・揚圧力の現状での計測箇所と計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表- 4. 13 に示す。

表- 4. 13 「考え方（案）」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較②

（Yダム、基礎排水孔での排水量・揚圧力の計測）

分類	「考え方(案)」において計測を継続すべき箇所等の考え方	適用条件	Yダムでの該当有無	Yダムでの現状	考え方(案)の適合性	備考
ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	②-1 最大断面ブロック付近の基礎排水孔	全てのダム	該当する	最大断面基礎部 1 か所のみで計測を実施	○	・基礎排水量及び揚圧力の基本計測データとして、現状どおり計測を継続すべきものである。
基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所	②-2 規模の大きな弱層(断層など)付近の基礎排水孔を含むブロック	規模の大きな弱層(断層など)を基礎岩盤に有するダム	該当なし	最大断面基礎部 1 か所のみで計測を実施	○	基礎岩盤の地質的に注意を要する箇所はないため、この観点からの計測箇所の追加する必要性は低い。
	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所の基礎排水孔を含むブロック	基礎岩盤の変形性の差が極端に大きい箇所を基礎岩盤に有するダム	該当なし	最大断面基礎部 1 か所のみで計測を実施	○	基礎岩盤の変形性が極端に大きい箇所が想定されないことから、当該条件に着目した追加計測の必要性はないと考えられる。
既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	②-4 以下の基礎排水孔を含むブロック ・排水量が多い ・揚圧力が高い ・排水量が多く揚圧力が高い ・濁水、土粒子の流出	試験湛水時や地震時などに注意を要する計測結果が得られたブロックがあるダム	該当あり (クロスギャラリーの下流側に揚圧力が上流側より高い箇所あり)	最大断面基礎部 1 か所のみで計測を実施	●	河床部揚圧力の確実な低下等のため、基礎排水孔を設置(再削孔)し、追加計測することが考えられる。
大規模地震後の迅速な安全性評価のために計測が必要と考えられる箇所	②-5 各ブロック 1 箇所の基礎排水孔	全てのダム	該当する	最大断面基礎部 1 か所のみで計測を実施	●	・河床部ブロックに各 1 か所程度基礎排水孔を設置(再掘削)し、追加計測することが考えられる

表- 4.13 により、Y ダムでの基礎排水孔における排水量・揚圧力計測に関する「考え方（案）」の適用性は以下のように整理できる。

②-1：最大断面ブロックでの計測

Y ダムでの揚圧力計測箇所を図- 4.9 に示す。揚圧力の計測は、図- 4.10 に示すように当初は最大断面付近のクロスギャラリーの4か所にて揚圧力計測を実施していた。1983 年頃までは計測を実施していたが、それ以降は計測を行っておらず、2004 年に新たに1 孔削孔を行い、計測を実施している。新設孔での計測データは、経年的に減少かつ安定傾向にある。このため、特段注意すべき傾向は認められないが、当該箇所は、Y ダムに限らず、基礎

排水量や揚圧力の計測を継続して実施すべき箇所であることは、「考え方（案）」に示すとおりであり、長期的に計測を継続すべき箇所である。

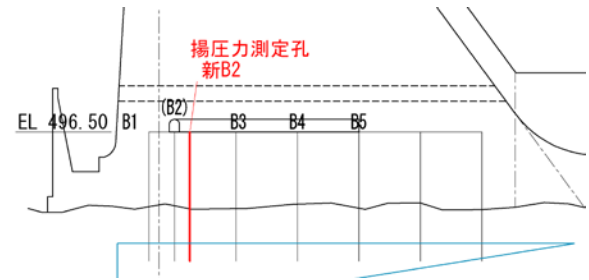


図- 4.9 揚圧力計測箇所 (Y ダム)

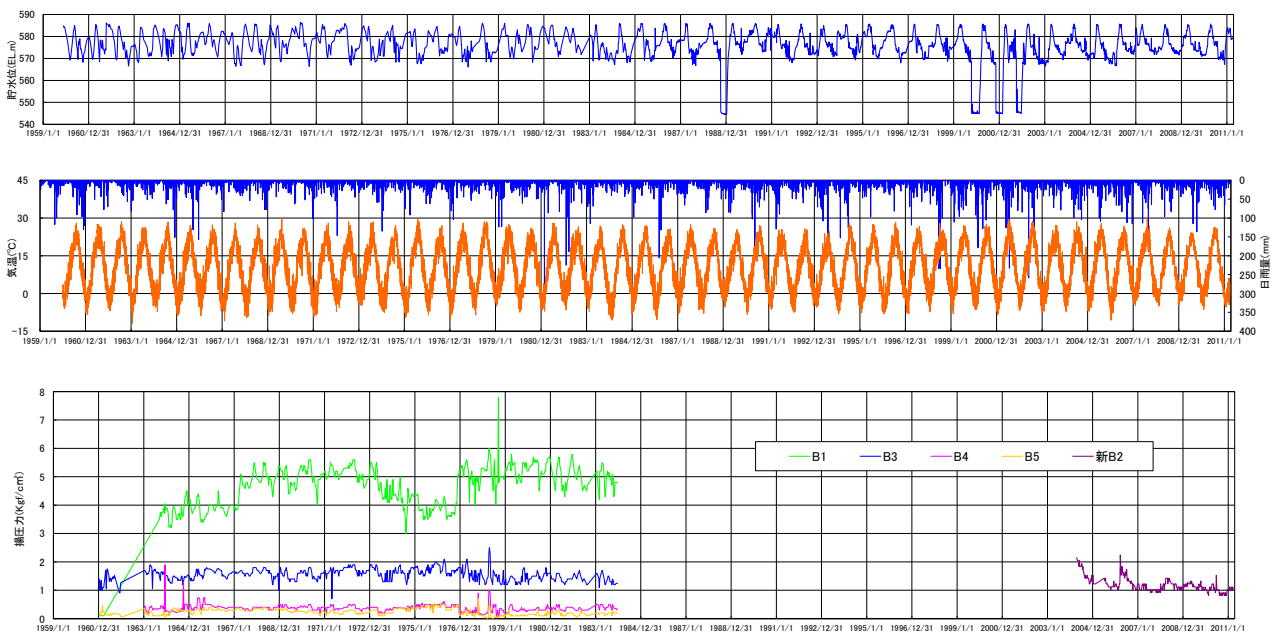


図- 4.10 揚圧力計測結果 (Y ダム)

②-2：基礎岩盤の地質上注意すべき箇所及び②-3：基礎岩盤の変形性の違いの観点から注意すべき箇所での計測

供用開始後の経過年数が長いY ダムでは、基礎岩盤に関する具体的な情報は、X ダムに比べ限られており、基礎岩盤の地質や変形性等の観点から計測を継続していることが明らかな箇所はない。しかし、工事誌によると、湛水開始後に貯水位が EL. 565mに達したとき、右岸側 (5BL) 下流より 10~15ℓ/sec の湧水が認められたことから、監査廊及び右岸グラウトトンネルからのグラウチングが実施されている。その結果、漏水は減少しなかったが水質調査等により、堤体下方からの浸透水である可能性は小さいと評価されている。また、左岸側の仮排水トンネル閉塞部下流側から少量の温水の湧出が漏水が認め

られたが、ダムの水和熱とは無関係であると確認されている。

このため、現状で「考え方（案）」に基づき追加計測箇所として挙げられる箇所はないが、上記のような建設時の記録も踏まえ、将来的に巡視や大規模地震時等の点検において漏水量や揚圧力の異常が認められる箇所が生じ、かつその位置等から地質条件との関連が推定された場合には、必要に応じ箇所を追加することも考えられる。このため、表- 4.13 の「②-2 規模の大きな弱層 (断層など) 付近の基礎排水孔を含むブロック」、「②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所の基礎排水孔を含むブロック」の「考え方（案）の適合性」の欄には、「(○)」を付している。

②-4：既往計測データから注意すべきと考えられる箇所での計測

Y ダムでは、現在は、基礎排水孔を用いた揚圧力計測は現状では最大断面基礎部 1 ヶ所以外の計測は実施していない。他の基礎排水孔は目詰まりしている可能性もあるため、確実にダムに作用する揚圧力を低減させる上で、作用する揚圧力が大きいと考えられる河床部付近のブロックに 1 ブロックあたり 1 箇所程度の基礎排水孔を再削孔し、揚圧力計測を行うなど、計測箇所の追加または復旧の必要性について検討することも必要と考えられる。このため、表-4.13 の「②-4 以下の基礎排水孔を含むブロック」の「考え方(案)の適合性」の欄には「●」を付している。ただし、仮に閉塞している基礎排水孔を再削孔したり新規に削孔する場合には、基礎岩盤内の浸透流を集中させるような地質的弱部が推定されないかを既往資料により確認したり、過大な排水や土粒子の排出がないかを試験削孔により確認するなど十分な注意が必要である。

②-5：大規模地震後の迅速な安全性評価のための計測

Y ダムでは、既往地震のうち 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、ダム基礎部での加速度が 29.7gal と比較的小さい値であったが、既設の最大断面基礎部の揚圧力は 1.02kgf/cm² (0.10MPa) から 1.12kgf/cm² (0.11MPa) と僅かながら増加した。大規模地震に向けてはさらに大きな揚圧力の変化が想定されることから、より安全側を考慮すれば、「考え方(案)」に示されているとおり、河床部断面の各ブロックには基礎排水孔を 1 孔程度配置することが望ましい。このため、

表-4.13 「②-5 各ブロック 1 箇所の基礎排水孔」の「考え方(案)の適合性」の欄には「●」を付している。ただし、この場合も、②-4 同様、閉塞している基礎排水孔を再削孔したり新規に削孔する場合には十分な注意が必要である。

③継目排水孔からの漏水量

Y ダムの継目排水孔からの漏水量の現状での計測箇所と計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表-4.14 に示す。表-4.14 により、Y ダムでの継目排水孔からの漏水量計測に関する「考え方(案)」の適用性は以下のように整理できる。

③-1：継目排水孔の漏水量計測

Y ダムでは、これまで継目排水孔での漏水量計測は実施されていない。このため、「考え方(案)」によれば、特段継目排水孔からの漏水量の計測を実施すべき箇所を挙げることはできないが、これまでの巡視、地震時点検等においても注意すべき継目漏水は認められていないことから、新たに継目排水孔の継続的な計測は実施せず、巡視による確認及び左右岸等の漏水量観測で代替することが現実的と考えられる。このため、表-4.14 の「考え方(案)の適合性」の欄には「(○)」を付したが、将来的に巡視や大規模地震時等の点検において継目漏水の増加が認められる箇所が生じた場合には、必要に応じ計測装置を設置し、追加的な計測を継続的に行っていくことが考えられる。このことは、「考え方(案)」に示した適用条件の考え方と矛盾しない。

表-4.14 「考え方(案)」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較③

(Y ダム、継目排水孔からの漏水量計測)

分類	「考え方(案)」において計測を継続すべき箇所等の考え方	適用条件	Y ダムでの該当有無	Y ダムでの現状		備考
				Y ダムでの現状	考え方(案)の適合性	
既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	③-1 試験湛水時や地震時に排水量が多くなった継目排水孔	試験湛水や地震時などに注意を要する計測結果が得られた横継目のあるダム	該当なし	築堤当初から計測を実施していないが、巡視により過去に注意すべき継目漏水は認められない。	○	・特に巡視により過去に注意すべき継目漏水は認められていないため、計測の必要性は低い。(巡視や地震後点検等で漏水の有無の確認で対応するのがよいと考えられる。)

表- 4.15 「考え方(案)」による計測を継続すべき箇所と計測の現状の比較④ (Y ダム、変形)

分類	「考え方(案)」において 計測を継続すべき箇所等の 考え方	適用条件	Yダムでの 該当有無	Yダムでの現状	考え方 (案)の 適合性	備考
ダムの構造 上計測に 適した箇 所	④-1 最大断面付近のブロック(基 本)でのブラムラインによ る変形(たわみ量)計測	最大断面付近のブ ロック(基本)での ブラムラインによる 変形(たわみ量)計 測	該当する	洪水吐左岸側の 1 か 所。	○	・本計測項目として、 引続き計測を継続す べきものである。
	④-2 各ブロックでの GPS 等による 変位計測	各ブロックでの GPS 等による変位 計測	該当なし (ブラムラインにより 基本的な変形量の計 測が適切になされて いる)	-	○	・現有のブラムライン での追加計測を要す る特段の状況は認め られない。

④変形

Y ダムの変形の現状での計測箇所と計測を継続すべき箇所として抽出される箇所との比較を表- 4.15 に示す。

表- 4.15 により、Y ダムでの変形計測に関する「考え方(案)」の適用性は以下のように整理できる。

④-1：ブラムラインによる変位計測

堤体変位は、ダム天端と基礎部の相対変位量が大きく検知が容易な最大断面付近にて計測するのが理想的である。しかし、Y ダムでは最大断面は越流部となっており、ブラムラインを設けることが困難なため、非越流ブロックの最大断面にブラムラインを設置し、堤体変位の計測が行われている。変位計測結果を図- 4.11 に示す。

現状ではブラムラインで計測された変位量のデータは、主に貯水位や外気温と相関を有する弾性的な年間変動を示している。なお、一時期計測が中断した期間(1984 年-1989 年)があり、前後のデータが不連続になっているものの、近年の計測データから経年的な変位振幅の増大も認められない。このような計測データの安定性を踏まえ、またダムの変状は最終的には堤体の変位に現れると考えられることを考慮し、Y ダムのように堤体にブラムラインが設置されているダムでは、ブラムラインによる堤体変位の計測を基本計測項目の1つとして長期的に継続していくべきものと考えられる。これは「考え方(案)」に示しているとおりである。

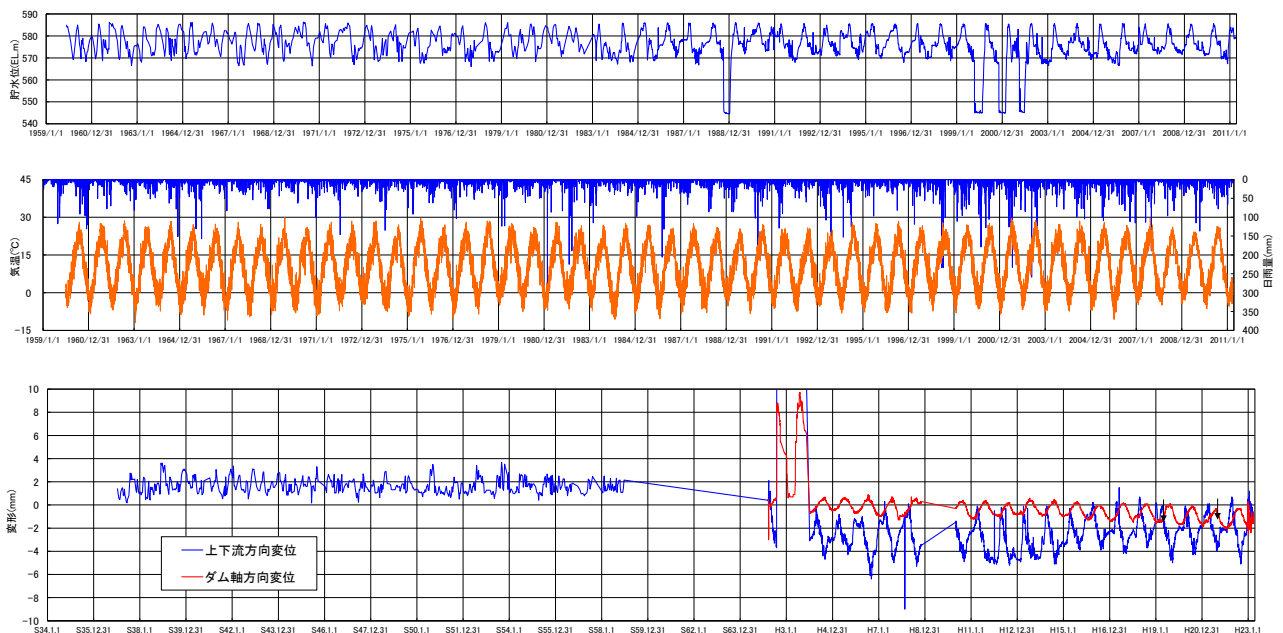


図- 4.11 変位計測結果 (Y ダム)

④-2 GPS 等による堤体変位の追加計測

Y ダムでは、工事誌、等設計・施工に関する記録及び供用開始後の安全管理における計測データから、長期的に堤体の変位を監視すべき要因となる未改良の地質的弱部や変状の発生履歴は見られない。よって、堤体変位の計測は、現状で実施されている基本的なプラムライン計測の継続によることでよいものと考えられる。これは「考え方（案）」で示した適用条件に合致するものである。

4.3 まとめ

今年度は、過年度に提案した長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方（案）について実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、その適用性の検証を行った。その結果、「考え方（案）」を実ダムに適用することで、長期的に継続して計測を実施すべき箇所を基本的には適切に抽出できることがわかった。ただし、以下の点については「考え方（案）」に明記されておらず、追記等の必要があると考えられる。

- 1) 計測継続箇所選定方法案を試行するにあたり、表-4.4 に示す計測項目のうち、三角堰等による漏水量計測では、ダムの構造や基礎岩盤の地質条件によって計測箇所を抽出する構成となっており、試験湛水中や供用開始後の計測データを考慮すべきことが明記されていなかった。後者の点は、比較的新しいダムで供用開始当初と同様、基礎排水孔等を用いた各ブロック別の計測が実施されているダムではそのデータを参照することで良いと考えられるが、ブロック別の計測が行われておらず、三角堰等により集約した漏水量の計測が基本となっているダムでは計測箇所の抽出上重要な要素となる。このため、「考え方（案）」の三角堰等を用いた漏水量の計測箇所を抽出する際の該当条件として、既往の計測データから、漏水量や貯水位変化等に応じた変位動向の特徴を考慮し、分離して計測が必要と考えられる箇所（範囲）がある場合を追加する必要があると考えられる。
- 2) 三角堰等を用いた漏水量計測を左右岸別や標高別に行うべきかどうかは、堤頂長や堤高といったダムの基本諸元だけでなく、地形条件や巡視経路となる監査廊延長、また基礎排水量等ブロック別計測の有無を考慮して検討すべきである。長期的な計測における計測継続箇所の考え方も同様である。このため、「考え方（案）」の三角堰等を用いた漏水量の計測を左右岸・標高別に

行う必要がある場合の該当条件として、上記の要件に該当する場合も含まれることを明示する必要があると考えられる。

- 3) 基礎排水孔を用いた排水量や揚圧力の計測を全孔で継続しているダムなど、計測箇所が多いダムでは、将来の計測の合理化のために計測箇所の省略も考慮する必要がある。このため、当面は計測を継続する場合であっても、将来的な計測装置の老朽化や管理人員の減少の可能性を考慮し、「考え方（案）」に示している継続計測箇所選定のための各種要件に従って、継続計測の優先度をあらかじめ検討しておくことが望ましいことを「考え方（案）」に付記しておくのがよいと考えられる。

また、今年度ケーススタディーを行った二つのケースの他に、供用開始時には計測箇所を適切に設定できていたが長期供用に伴う計器の老朽化や故障により、結果的に当初必要とされた箇所の計測が継続できていないものがあるケースが考えられる。引き続きこのようなケースでの計測再開箇所の優先度や計測中断による影響を定量的に評価する手法などについて検討を加え、挙動が安定したダムにおいても長期的に計測を継続すべき項目・箇所等の抽出の考え方として取りまとめていく予定である。

5. まとめ

ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理手法の確立に向けて、①ダム本体等の劣化・損傷機構の類型化、②ダム本体の劣化・損傷が堤体の安全性に及ぼす影響度を定量的に評価する手法の検討として、常時微動計測により振動特性の変化の検知することで堤体の健全度診断を行う手法の適用性、及び堤体内の劣化・損傷が堤体の安全性に及ぼす影響、③挙動の安定した長期供用ダムにおいても継続すべき計測項目・箇所の考え方について検討した。今年度の検討で得られた成果について以下に示す。

① ダム本体等の劣化・損傷機構の類型化

コンクリートダム本体等の劣化・損傷事象に関する過年度の調査・分析結果を踏まえ、長期供用に伴い想定すべき劣化・損傷機構について、Ⅰ）表面の温度クラック（竣工後初期の温度降下過程において堤体表面に発生するクラック）、Ⅱ）堤体内部の進行性クラック（堤体内部に及ぶ水平打継面沿いのクラックなど、貯水の浸入や環境作用を受けて進行する恐れのあるクラック）Ⅲ）堤

体表面の進行性劣化（堤体材料（骨材）やコンクリートの乾湿繰り返し等により堤体表面の劣化により発生・進行するクラック）Ⅳ）流水作用による劣化（摩耗や不陸に起因して生じる洪水吐きコンクリートのすりへりや剥離など）Ⅴ）大規模地震による損傷（偶発外力の作用に伴う他原因による既発生クラックの進行）に整理した。また、

このうち、発生・進行のしやすさまたは進行した場合の影響の程度からは、経年劣化に伴う上記Ⅱ）による劣化及び偶発外力による上記Ⅴ）の損傷を特にダムの安定性に大きな影響を及ぼす可能性があるものとして評価した。

② ダム本体の劣化・損傷が堤体の安全性に及ぼす影響度を定量的に評価する手法の検討

・常時微動計測によるダム堤体の健全度診断に関する検討

ダム堤体の劣化・損傷の発生・進行に伴う振動特性の変化を常時微動計測により捉え、堤体の健全度診断を行う手法の適用性について、数値解析及び実際のダムの常時微動計測により検討した。数値解析では、劣化・損傷の発生・進行が堤体の振動特性（固有振動数）に及ぼす影響を推定するため、①の検討でダムの安定性に及ぼす影響が特に大きいと評価した水平打継面沿いのクラックのほか、比較的報告事例が多い堤体表面からの進行性劣化を想定し、劣化の位置・範囲等を変化させて固有値解析を行い、固有振動数の変化を分析した。その結果、水平打継面沿いのクラックについては、低標高部に発生した連続したクラックほど常時微動計測で検出しやすい一次固有振動数の変化（減少）が大きく、検知しやすいと考えられること、逆に高標高部のクラックや連続性に乏しいクラックは相対的にその検知が難しいことが分かった。また、堤体表面からの劣化の影響がコンクリートの剛性の低下として表れることを想定した解析より、コンクリートの剛性が低下する深さ（劣化深さ）が大きくなるほど、また弾性係数の低下量が大きいほど固有振動数の変化（減少）が大きいくことが分かった。一方、実ダムでの常時微動計測では、貯水位や温度により堤体の固有振動数が変化する傾向が明瞭に捉えられた。また、堤体補修を行ったダムでの補修前後の比較を行ったが、限られた計測から補修による影響（効果）を評価するのは困難であり、ダムの振動特性を常時微動計測から評価するには一定期間、一定の頻度または連続的な計測を行うことが重要であることが分かった。

・堤体内の劣化・損傷が堤体安全性に及ぼす影響に関する

検討

コンクリートダム堤体の安定性に影響が大きいと考えられる水平打継面沿いのクラックを主に想定し、当該クラックがダムの安定性に及ぼす影響を評価する手法として、震度法により地震力を考慮し、クラック上部の堤体の転倒・滑動に対する安全率の変化により評価する方法に加え、大規模地震によるクラックの進展を考慮する非線形動的解析によりその影響を評価する手法について検討した。前者の検討では、水平打継面のクラックが深くなるほど転倒・滑動に対する安定性の低下が大きくなるが、転倒に対する安定性の方が問題となる可能性が高いことが分かった。また、後者の検討では、あらかじめ発生しているクラック位置や深さにより、当該クラックが堤体を貫通するに至る地震動の強さが変わることが分かった。限られた条件での検討ではあるが、これらの手法によれば、クラック等の劣化・損傷の発生位置が、ダムの安全性（堤体の安定性）に及ぼす影響を定量的に評価でき、点検や対策箇所の優先度を判断する上で有効な情報を与えるものとなると考えられる。

③ 挙動の安定した長期供用ダムにおいても継続すべき計測項目・箇所の考え方の検討

過年度に検討した長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方（案）（以下「考え方（案）」）について、実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、その適用性の検証を行った。その結果、「考え方（案）」を実ダムに適用することで、概ね長期的に継続して計測を実施すべき箇所を適切に抽出できることがわかった。しかし、ケーススタディーの結果、「考え方（案）」に明記されていないが実ダムへの適用にあたって考慮すべき事項として、1) 三角堰等を用いた漏水量計測箇所の抽出は、ダムの構造や地質条件だけでなく、既往の計測データの分析結果も考慮して行うべきこと、2) 漏水量計測を左右岸別や標高別に行うべきかどうかは、堤頂長や堤高といったダムの基本諸元だけでなく、地形条件や巡視経路となる監査廊延長、また基礎排水量等ブロック別計測の有無を考慮して検討すべきであること、3) 基礎排水孔を用いた排水量や揚圧力の計測を全孔で継続しているダムなど、将来的な計測装置の老朽化や管理人員の減少の可能性を考慮し、「考え方（案）」に示している継続計測箇所選定のための各種要件に従って、継続計測の優先度をあらかじめ検討しておくことなど、「考え方（案）」に追記しておくべきことが判明した。

今後は、以上の知見を踏まえ、長期的なダムの維持管

理において想定すべき劣化・損傷を想定した健全度診断手法として常時微動計測による手法の適用条件の明確化を図るとともに、類型化したダム堤体の劣化・損傷機構や劣化・損傷の進行によってダム堤体の安全性(安定性)に及ぼす影響度についての評価手法の検討などを踏まえ、巡視や各種点検等により報告される劣化・損傷の合理的な評価の考え方について取りまとめていきたい。また、長期供用ダムにおける安全管理のための計測の合理的な考え方についても、今回のケーススタディー結果を踏まえ再整理し、取りまとめる予定である。

参考文献

- 1) 山口嘉一、金銅将史、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究、平成 23 年度プロジェクト研究報告書、独立行政法人土木研究所
<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2011/pdf/pro-13-6.pdf>
- 2) 山口嘉一、金銅将史、小堀俊秀、大舘渉：コンクリートダムの劣化・損傷事象の調査・分析、ダム技術、No. 304、pp. 31-44、2012. 1.
- 3) ダムの定期検査の手引き(国土交通省河川局河川環境課監修)、2002. 2.
- 4) 上島照幸、金澤健司、村上弘太、仲村成貴、塩尻弘雄、有賀義明：常時微動・地震動の長期継続観測による高経年化したアーチダムの振動特性同定と 2011 年東北地方太平洋沖地震時のダムの振動挙動、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol. 68、No. 4 (地震工学論文集第 31-b 巻)、I 186-I 194、2012
- 5) 大熊信之、畑元浩樹、金澤健司：常時微動計測データから明らかとなった高経年大規模アーチダムの動的特性、電力土木、341 号、pp. 9-17、2009. 5
- 6) 大町達夫：1999 年台湾集集地震によるダムの被害について、ダム工学 Vol. 10 No. 2、pp. 138-150
- 7) 山口嘉一、岩下友也、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究、平成 22 年度戦略研究報告書、独立行政法人土木研究所
<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2010/pdf/sen-28.pdf>
- 8) 改定 解説・河川管理施設等構造令(財団法人国土開発技術研究センター編)：山海堂、2000. 1.
- 9) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説、2005. 3.
- 10) 三浦房紀、沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法、土木学会論文集、第 404 号/1-11、1989. 3.
- 11) 岩下友也、原 基樹、吉永寿幸、山口嘉一：短周期成分が卓越する地震動のダムに及ぼす影響、地震工学論文集、Vol. 66、No. 1、115-134、2010
- 12) (社) 日本大ダム会議：改定 ダム構造物管理基準、1986. 5
- 13) 山口嘉一、小堀俊秀：重力式コンクリートダムの安全管理における必要最小限の計測箇所選定方法の提言、ダム工学、Vol. 21、No. 4、pp. 263-271、2011. 12.

MAINTENANCE TECHNOLOGY FOR EXTENSION OF LIFESPAN OF DAMS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2009-2013

Research Team : Hydraulic Engineering Research
Group (Dam and Appurtenant Structure
Research Team)

Author : SASAKI Takashi

KONDO Masafumi

SATOH Hiroyuki

KOBORI Toshihide

SAKAMOTO Hiroki

KIEINASHIZAWA Toru

Abstract : In view of the effective use of existing stocks, appropriate management and maintenance of dams structures for their long-term use considering actual status of a dam and its influence on the safety of dam are very important. However, our knowledge about ongoing or potential aging of dam body is not sufficient. This study aims to solve this problem by investigating long-term deterioration or damaging process of dam body, developing a quantitative method to evaluate the safety of dam considering the effect of aging or damages and clarifying how to continue measurement for safety management at long-used dams.

In this fiscal year, 1) typical mechanisms of deterioration or damaging process of a dam body were identified by analyzing inspection records of aging concrete dams. 2) As a method to evaluate the soundness of dam body by focusing on the change of vibration characteristics, probability of using microtremor measurement were studied by numerical simulations and measurement at several actual dams. A method to evaluate the safety of dam considering deterioration or damages is also discussed. 3) Case studies to verify the applicability of proposed draft for selecting measurement points at long-used dams are carried out.

Key words : dam, deterioration and damage, soundness evaluation, microtremor measurement, safety management